

# Trabajo Fin de Máster

## Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

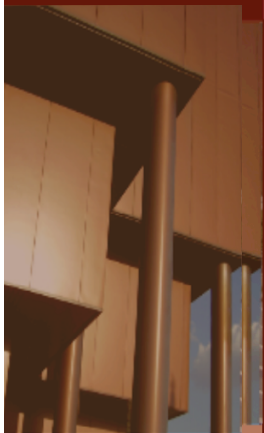
### Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf

Autor: José María Tortolero Jara

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de  
Fluidos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017







Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf**

Autor:

José María Tortolero Jara

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster: Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf

Autor: José María Tortolero Jara

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor, Alejandro Ruiz, por su constante ayuda durante estos meses de desarrollo del trabajo, además de despertar en mí, aún mas, el interés por la Ingeniería Marítima. Tu disposición ha sido total siempre que te lo he pedido.

También quiero agradecer a todos mis compañeros con los que he compartido incontables horas de biblioteca, de trabajos y exámenes que, ayudándonos mutuamente, hemos conseguido sacar adelante. He tenido la suerte de formar muy buenas amistades con muchos de ellos, que seguro mantendremos siempre. A todos ellos, gracias.

Por último, agradecer en especial a mis familiares y seres queridos, que siempre me han apoyado y soportado durante los momentos más duros de la carrera.

*José María Tortolero Jara*

*Sevilla, 2017*

# Resumen

---

Durante las últimas décadas el surf se ha convertido en un deporte en auge. La práctica del surf requiere de unas condiciones de olaje que no tienen lugar en todas las playas, cuya surfeabilidad o grado de dificultad se puede determinar mediante una serie de parámetros: peel angle, altura de ola, longitud de sección e intensidad y tipo de rotura son los más relevantes. Los arrecifes artificiales tienen como misión mejorar estas condiciones, convirtiendo olas no surfeables en surfeables.

En este trabajo, se han diseñado dos tipos de arrecifes variando su ángulo de abertura, de 66° a 45°, en el litoral de Conil de la Frontera (Cádiz). Para conocer la viabilidad y el impacto en la surfeabilidad provocados por estas estructuras a lo largo de su vida útil, se ha desarrollado una nueva herramienta basada en la técnica de interpolación de *downscaling*. En primer lugar se ha propagado numéricamente un subconjunto representativo del registro histórico de oleaje mediante el modelo SWAN, para, posteriormente, calcular los parámetros de surf en cada estado de mar propagado. Estos parámetros de surf pueden ahora ser interpolados mediante la técnica *downscaling* para toda la serie de datos, evitando así la propagación de todo el registro.

Los resultados obtenidos evidencian que la operatividad con el arrecife aumenta en torno a un 50% respecto al estado previo, es decir, se podría practicar surf el doble de días. El tipo de rotura también mejora respecto a la situación anterior, predominando la rotura tipo *plunging*, considerada la ideal por los surfistas. Esta mejora responde al perfil convexo que se ha diseñado, que fomenta precisamente este tipo de roturas así como un aumento de la intensidad de la ola. El *peel angle* resulta clave en el grado de dificultad de la ola, siendo mayor cuanto menor sea el ángulo. El arrecife provoca un aumento notable de éste ángulo, y, como consecuencia, un aumento general de la surfeabilidad de ola, pasando en el caso en estudio del 10% de olas de dificultad baja-media al 70%. Para realizar este estudio de viabilidad, el método de *downscaling* ha permitido disminuir los costes computacionales de forma extraordinaria, al reducir el proceso de propagación de toda la serie histórica a únicamente un subconjunto representativo. Los resultados obtenidos son lo suficientemente precisos para elaborar un estudio de viabilidad fiable.

**Palabras clave:** arrecife artificial, parámetros de surf, *peel angle*, surfeabilidad, *downscaling*.



# Abstract

---

Surfing has become an extremely popular sport over the last few decades. However, not all beaches are appropriate for practicing this sport, as they do not meet the specific wave conditions and requirements needed. Wave height, peel angle, break intensity, and section length are identified as essential parameters to describe surfing waves and let them have surfability. The main goal of artificial reefs is to increase the local surfing possibilities, ensuring surfable waves.

In this MsC Thesis, two different reefs have been designed, varying their angles from  $66^\circ$  to  $45^\circ$ , in the coast of Conil de la Frontera (Cádiz). In order to know the viability and impact they have on wave surfability during its service life, a new method based on the downscaling interpolation has been developed. Firstly, a representative wave selection of the historical wave database has been numerically propagated by the computed model SWAN. Once the propagation process is performed, it is possible to calculate the surfing parameters for each data obtained. Afterwards, these parameters can be interpolated using downscaling technique for the whole database.

The obtained results show that the reef provides an increase in surfable waves of 50%. This means that surfers can practice twice as long. The breaker shape has also been improved, being plunging breaker the most common. Plunging breaker, which is preferred by most surfers, has been achieved by designing a convex profile. This profile, apart from helping create this breaker, has contributed to increasing the break intensity. Peel angle turns out to be a key factor in the surfability of a wave. The greater the peel angle, the less difficulty the wave will have. The reef ensures a significant increase of this angle and, as a consequence, another augmentation in the degree of difficulty the wave has, improving from 10% to 70% the suitable waves for surfing starters. In order to carry out the viability study, the downscaling technique has made it possible to minimize the computing time enormously, by avoiding the wave propagation process from the entire historic database. The results obtained are accurate enough to elaborate a reliable viability study.

**Key words:** artificial reef, surfing wave parameters, peel angle, surfability, downscaling.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>10</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>15</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>16</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>19</b>
<b>2 Objetivos del trabajo</b>	<b>20</b>
<b>3 Zona de estudio</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Emplazamiento</i>	11
3.2 <i>Batimetría</i>	12
3.3 <i>Mareas</i>	13
3.4 <i>Clima marítimo</i>	15
<b>4 Las olas de surf</b>	<b>20</b>
4.1 <i>Conceptos previos</i>	20
4.2 <i>Parametros de surfeabilidad</i>	22
4.2.1 <i>Altura de ola en rotura (<math>H_B</math>)</i>	23
4.2.2 <i>Peel Angle (<math>\alpha</math>)</i>	23
4.2.3 <i>Intensidad y tipo de rotura de ola (<math>B_l</math>)</i>	24
4.2.4 <i>Longitud de la sección de ola (<math>S_L</math>)</i>	27
4.3 <i>Maniobras de surf</i>	27
<b>5 Diseño del arrecife</b>	<b>29</b>
5.1 <i>Posición</i>	29
5.2 <i>Geometría</i>	30
5.2.1 <i>Forma del arrecife</i>	30
5.2.2 <i>Ángulo de abertura</i>	31
5.2.3 <i>Altura y profundidad</i>	31
5.2.4 <i>Perfil del arrecife</i>	32
5.3 <i>Orientación</i>	34
5.4 <i>Conclusión</i>	35
<b>6 Metodología</b>	<b>36</b>
6.1 <i>Introducción</i>	36
6.2 <i>Modelo numérico</i>	37
6.2.1 <i>Fundamentos teóricos</i>	38
6.3 <i>Modelización</i>	39
6.3.1 <i>Grid y anidamiento</i>	40

6.3.2	Condiciones de contorno	42
6.4	<i>Transformación oceanográfica</i>	42
6.4.1	Selección de subconjunto representativo	43
6.4.2	Propagación de oleaje	45
6.4.3	Cálculo parámetros de surf	46
6.4.4	Interpolación y reconstrucción	52
6.5	<i>Simulaciones</i>	53
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>54</b>
7.1	<i>Arrecife 66 grados</i>	55
7.2	<i>Arrecife 45 grados</i>	65
		68
7.3	<i>Comparación entre arrecifes de 66º y 45º</i>	69
7.4	<i>Estadío previo</i>	71
7.5	<i>Comparación entre situación previa y con arrecife</i>	74
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>81</b>
	<b>Referencias</b>	<b>82</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 3-1</b> Extremos de niveles cada 5 min (cm)	14
<b>Tabla 3-2</b> Información del Punto SIMAR 5034009	17
<b>Tabla 4-1</b> Clasificación según el Peel Angle y la Altura de ola	24
<b>Tabla 4-2</b> Forma de Rotura según Número de Iribarren	26
<b>Tabla 4-3</b> Clasificación de Hutt según la intensidad de rotura	26
<b>Tabla 5-1</b> Pendientes del perfil	33
<b>Tabla 5-2</b> Resumen parámetros de diseño del arrecife	35
<b>Tabla 6-1</b> Vidas útiles mínimas en años	36
<b>Tabla 6-2</b> Características del grid para cada malla	41
<b>Tabla 6-3</b> Parámetros obtenidos tras la propagación de oleaje	46
<b>Tabla 7-1</b> Resumen del impacto generado por el arrecife a los parámetros	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3-1</b> Situación y emplazamiento del arrecife a diseñar	11
<b>Figura 3-2</b> Zona de descarga de la batimetría en aguas indefinidas	12
<b>Figura 3-3</b> Esquema del mareógrafo del puerto de Tarifa	13
<b>Figura 3-4</b> Niveles medios diarios en Tarifa. Año 2014.	14
<b>Figura 3-5</b> Ubicación del SIMAR 6024030	15
<b>Figura 3-6</b> Batimetría de la zona de estudio. Posición SIMAR y Arrecife.	16
<b>Figura 3-7</b> Rosa de altura significativa en SIMAR 6024030 en el periodo 2005-2017	16
<b>Figura 3-8</b> Situación del Punto SIMAR 5034009	17
<b>Figura 3-9</b> Rosa de oleaje del SIMAR en aguas indefinidas (1958-2016)	18
<b>Figura 3-10</b> Serie temporal de altura de ola significativa	18
<b>Figura 3-11</b> Rosa de vientos del SIMAR en aguas indefinidas (1958-2016)	19
<b>Figura 4-1</b> Perfil de playa típico (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)	21
<b>Figura 4-2</b> Fenómeno de refracción	21
<b>Figura 4-3</b> Esquema de las zonas típicas de surf ( MOFFAT, y otros, 1981)	22
<b>Figura 4-4.</b> Peel angle ( $\alpha$ ) y sus vectores de velocidades	23
<b>Figura 4-5</b> Tipos de rotura de ola	25
<b>Figura 4-6</b> Pendiente según el avance de la ola en comparación con la recta de máxima pendiente del talúd	25
<b>Figura 4-7</b> Ejemplo de diferentes tipos de secciones en una ola de surf	27
<b>Figura 4-8.</b> Relación entre el porcentaje del tipo de maniobra que ejecuta un surfista y su nivel. (Scarfe, 2002)	28
<b>Figura 4-9.</b> Rango de los peel angle apropiados para cada maniobra (Scarfe, 2002)	28
<b>Figura 5-1.</b> Formación de dos celdas (izq. 100 m) y cuatro celdas (der. 250 m).	29
<b>Figura 5-2.</b> Arrecife de Bingin. De izquierda a derecha – Batimetría; modelo numérico con la refracción sobre el arrecife; esquema simple del arrecife. (Mead, S.T. and Black, K.P., 2001b)	30
<b>Figura 5-3</b> Definición del ángulo de abertura	31
<b>Figura 5-4</b> Perfil del convexo arrecife. El gradiente del perfil disminuye conforme desciende la profundidad.	32
<b>Figura 5-5</b> Croquis del perfil convexo del arrecife (Black, y otros, 2009)	33
<b>Figura 5-6</b> Croquis orientación del arrecife	34
<b>Figura 5-7</b> Arrecife con ángulo de incidencia de oleaje de 0°	34

<b>Figura 5-8</b> Esquema de refracción desde el SIMAR hasta el arrecife	35
<b>Figura 5-9</b> Croquis de la sección del arrecife diseñado	35
<b>Figura 6-1</b> Esquema de la metodología de cálculo	37
<b>Figura 6-2</b> Ejemplo de un espectro direccional de oleaje $E(\sigma, \theta)$ tipo swell	38
<b>Figura 6-3</b> Discretización espacial en mallas para el caso en estudio	39
<b>Figura 6-4</b> Dominio de la Malla 1	40
<b>Figura 6-5</b> Dominio de la Malla 2	41
<b>Figura 6-6</b> Dominio de la Malla 3	41
<b>Figura 6-7</b> Contornos de entrada de oleaje	42
<b>Figura 6-8</b> Paso 1: Selección del subconjunto representativo	43
<b>Figura 6-9</b> Distribución de casos seleccionados. Dirección-Altura de ola	44
<b>Figura 6-10</b> Distribución de casos seleccionados. Periodo-Altura de ola	44
<b>Figura 6-11</b> Paso 2: Propagación del oleaje	45
<b>Figura 6-12</b> Mapa de altura de ola obtenido en los arrecifes de $66^\circ$ y $45^\circ$	45
<b>Figura 6-13</b> Mapa de fracción de rotura obtenido en los arrecifes de $66^\circ$ y $45^\circ$	46
<b>Figura 6-14</b> Paso 3: Cálculo de los parámetros de surf en los 300 E.M.	47
<b>Figura 6-15</b> Perfiles transversales cada 20 metros	47
<b>Figura 6-16</b> Perfiles transversales hasta la batimétrica de 8 m	48
<b>Figura 6-17</b> Detalle de la división de perfiles en puntos de evaluación en la cresta	48
<b>Figura 6-18</b> Ejemplo de interpolación con la función <i>griddata</i>	49
<b>Figura 6-19</b> Variación de la altura de ola en un perfil	50
<b>Figura 6-20</b> Ejemplo de línea de rotura	50
<b>Figura 6-21</b> Ejemplo mapa de altura de olas para el estado de mar $Dir=290^\circ$ ; $H_s=3.1\text{m}$ ; $T=12\text{s}$	51
<b>Figura 6-22</b> Mapa de direcciones y altura de ola	52
<b>Figura 7-1</b> Zonas del arrecife	55
<b>Figura 7-2</b> Análisis de la operatividad en la cresta. Arrecife $66^\circ$	56
<b>Figura 7-3</b> Análisis de operatividad en las aspas. Arrecife $66^\circ$	56
<b>Figura 7-4</b> Análisis del tipo de surfista en la cresta. Arrecife $66^\circ$	57
<b>Figura 7-5</b> Análisis del tipo de surfista en el aspa sur. Arrecife $66^\circ$	58
<b>Figura 7-6</b> Evolución temporal de la altura de ola en rotura. Arrecife $66^\circ$	58
<b>Figura 7-7</b> Evolución temporal del peel angle. Arrecife $66^\circ$	59
<b>Figura 7-8</b> Evolución temporal de la intensidad de rotura. Arrecife $66^\circ$	59
<b>Figura 7-9</b> Porcentaje de intensidad de rotura. Arrecife $66^\circ$ .	60
<b>Figura 7-10</b> Evolución temporal del número de Iribarren. Perfil 10. Arrecife $66^\circ$	60
<b>Figura 7-11</b> Evolución temporal del número de Iribarren. Perfil 6. Arrecife $66^\circ$	61
<b>Figura 7-12</b> Porcentaje del tipo de rotura. Arrecife $66^\circ$	61
<b>Figura 7-13</b> Análisis de la operatividad en función de la marea	62
<b>Figura 7-14</b> Análisis de la influencia de $H_{s0}$ , $T$ y $\theta_0$ en el nivel del surf obtenido	62

<b>Figura 7-15</b> Variación del <i>Peel Angle</i> en el arrecife	63
<b>Figura 7-16</b> Detalle del cambio del <i>Peel Angle</i> en la punta del arrecife	63
<b>Figura 7-17</b> Análisis de la relación <i>Peel Angle</i> - $\theta_o$	64
<b>Figura 7-18</b> Relación $Hs_0$ - $H_b$	65
<b>Figura 7-19</b> Análisis de la operatividad en la cresta. Arrecife 45°	65
<b>Figura 7-20</b> Análisis de operatividad en las aspas. Arrecife 45°	66
<b>Figura 7-21</b> Comparativa <i>Peel Angle</i> . Arrecife 66°	67
<b>Figura 7-22</b> Comparativa <i>Peel Angle</i> . Arrecife 45°	67
<b>Figura 7-23</b> Análisis del tipo de surfista en la cresta. Arrecife 45°	68
<b>Figura 7-24</b> Análisis del tipo de surfista en el aspa norte. Arrecife 45°	68
<b>Figura 7-25</b> Análisis del tipo de surf en el aspa sur. Arrecife 45°	69
<b>Figura 7-26</b> Comparación de la operatividad entre arrecifes	69
<b>Figura 7-27</b> Comparación del <i>Peel Angle</i> entre arrecifes	70
<b>Figura 7-28</b> Comparación de la altura de ola en rotura entre arrecifes	70
<b>Figura 7-29</b> Comparación de la forma de rotura entre arrecifes	71
<b>Figura 7-30</b> Análisis de operatividad en el estado previo	71
<b>Figura 7-31</b> Análisis tipo de surf. Estado previo	72
<b>Figura 7-32</b> Evolución temporal del tipo de rotura. Estado previo	72
<b>Figura 7-33</b> Porcentaje de los tipos de rotura. Estado previo	73
<b>Figura 7-34</b> Evolución temporal de la intensidad de rotura. Estado previo	73
<b>Figura 7-35</b> Porcentaje de los tipos de rotura. Estado previo	74
<b>Figura 7-36</b> Comparación de operatividad entre estado previo y situación con arrecife	74
<b>Figura 7-37</b> Comparación operatividad no arrecife – arrecife 45°	75
<b>Figura 7-38</b> Comparación operatividad no arrecife - arrecife 66°	75
<b>Figura 7-39</b> Comparación de la altura de ola en rotura entre estado previo y situación con arrecife	75
<b>Figura 7-40</b> Detalle variación de la altura de ola entre situación con arrecife y estado previo.	76
<b>Figura 7-41</b> Comparación del <i>peel angle</i> entre estado previo y situación con arrecife	76
<b>Figura 7-42</b> Comparación del tipo de rotura entre estado previo y situación con arrecife	77
<b>Figura 7-43</b> Comparación del tipo de rotura entre estado previo y situación con arrecife	77
<b>Figura 7-44</b> Comparación de rangos de intensidad de rotura entre estado previo y situación con arrecife	78
<b>Figura 7-45</b> Comparación del grado de dificultad de la ola entre estado previo y situación con arrecife	78
<b>Figura 7-46</b> Mapa de fracción de rotura. Estado previo	79
<b>Figura 7-47</b> Mapa de fracción de rotura. Arrecife 66°	79



# 1 INTRODUCCIÓN

---

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la  
Ingeniería la que cambia el mundo*

*- Isaac Asimov -*

En las últimas décadas el surf se ha convertido en uno de los deportes acuáticos más populares, con un crecimiento constante de personas dispuestas a practicarlo como actividad de ocio. La práctica del surf requiere una serie de condiciones que no satisfacen todas las playas. Por ello, la Ingeniería Marítima ha desarrollado unas estructuras a modo de arrecife artificial que pueden favorecer estas condiciones.

Para saber si una ola es apta para el surf existen una serie de parámetros que definen sus condiciones de surfeabilidad. Los arrecifes artificiales tienen como misión mejorar estas condiciones, pasando de olas no surfeables a surfeables. La forma de estas estructuras están inspiradas en los arrecifes naturales, muchos de los cuales generan condiciones idóneas para la práctica del surf. Este es el caso de los arrecifes de Cokes y Chickens en Maldivas, consideradas como una de las mejores playas del mundo para los surfistas.

Durante la última década, son numerosos los artículos científicos que se han desarrollado acerca de la construcción, diseño y modelización numérica de los arrecifes artificiales. Los primeros estudios estaban enfocados en evaluar la dificultad o surfeabilidad de las olas (Hutt, y otros, 2001) (Scarfe, y otros, 2003) en función de unos parámetros de surf anteriormente definidos (Walker, y otros, 1972), (Dally, W.R., 1990). Posteriormente, se comenzó a desarrollar el diseño de estos arrecifes, teniendo en cuenta no sólo la surfeabilidad, sino también la protección de la costa mediante estudios morfodinámicos (Neves, 2006) (Black, y otros, 2009) (Mendonça, y otros, 2012). Todos ellos realizan comprobaciones de sus modelos bajo condiciones de mar típicas, considerando generalmente dos condiciones de oleaje (normal y tormenta) y dos niveles de marea (media y baja). Hasta la fecha, no se han realizado simulaciones para largas series temporales debido a su elevado coste computacional.

En la actualidad, y cada vez más, se invierte grandes recursos en la protección, conservación y mejora de las playas debido a la enorme importancia en la sociedad y en la economía local que representan. Si bien este trabajo se centra en la mejora de las condiciones de surf, los arrecifes artificiales se presentan también como un concepto innovador para la protección de costas, disminuyendo los fenómenos de erosión cada vez más vigentes en las playas.

En España, Puertos del Estado ofrece información de series temporales desde el año 1958 hasta la actualidad con datos de variables oceanográficas para cada hora. Esta inmensa cantidad de información podría ser de gran utilidad para conocer la viabilidad de un arrecife artificial a lo largo de su vida útil y representar fielmente su respuesta, pero resulta a su vez inabordable una simulación del proceso completo. Por esta razón, este trabajo pretende ofrecer una nueva herramienta para el diseño y optimización de los arrecifes artificiales, basada en el empleo de técnicas de interpolación que permitan optimizar el proceso.

La aplicación de esta herramienta se realizará en aguas de Cádiz, en la playa de Conil de la Frontera, mediante el diseño y optimización de dos tipos de arrecifes artificiales. No obstante, la metodología del trabajo son extrapolables a cualquier lugar.

## 2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

---

*Lo más incomprensible acerca de este mundo es que es comprensible.*

*- Albert Einstein -*

Este Trabajo Fin de Máster tiene dos objetivos principales. En primer lugar se pretende establecer unos **parámetros de diseño** generales que garanticen el buen funcionamiento de los arrecifes artificiales. Estos parámetros se particularizarán para la zona de estudio: Conil de la Frontera, Cádiz. Este primer objetivo conlleva las siguientes tareas:

- Análisis del clima marítimo en la zona de estudio.
- Caracterización de las olas de surf y sus maniobras.
- Definición de los parámetros de diseño: posición, geometría, orientación, etc.

En segundo lugar, una vez que se cuenta con el prediseño del arrecife, se pretende formular una nueva herramienta que permita optimizar el estudio de la **viabilidad del arrecife** para su vida útil. Los pasos para la consecución de este objetivo son los siguientes:

- Selección de subconjunto representativo de datos oceanográficos.
- Propagación de oleaje.
- Cálculo de los parámetros de surf.
- Interpolación y reconstrucción mediante el algoritmo de máxima disimilitud.

Para este último objetivo se ha empleado modelos numéricos de propagación y funciones programadas en MATLAB®.

## 3 ZONA DE ESTUDIO

*Del mar llega este elemento,  
que acrisolan las solanas  
con labores artesanas  
y la luz de mis marismas,  
formando los blancos prismas  
de las costas gaditanas*

- Ana Vizcarrondo -

Las mejores playas para la práctica de surf en el sur de España se encuentran en el litoral gaditano. Playas como Los Lances en Tarifa, las de Caños de Meca en Barbate o El Palmar son famosas entre los amantes del surf. Muy próxima a esta última se encuentra la playa de Conil de la Frontera, donde muchos aficionados se lanzan con su tabla al mar para introducirse en este apasionado mundo del surf.

Debido al auge de este deporte en la zona, se ha optado por esta playa como aplicación del trabajo. La implantación de un arrecife artificial consolidaría un punto de referencia tanto para surfistas amateurs como profesionales.

### 3.1 Emplazamiento

El arrecife a simular se ubica en el municipio español de Conil de la Frontera de la provincia de Cádiz (España). Su término municipal ocupa 87 km<sup>2</sup>, está limitado por el Océano Atlántico por el oeste y presentaba una población en 2015 de unos 22.000 habitantes.



**Figura 3-1** Situación y emplazamiento del arrecife a diseñar

Debido al gran desarrollo turístico que ha surgido en esta localidad costera en los últimos años, Conil ha pasado a ser uno de los enclaves de la costa gaditana, presentando cada vez mayor interés en las inversiones turísticas.

Es el turismo deportivo uno de los mayores atractivos de la localidad, especialmente el surf y el kite surf, presentando su época de mayor actividad en verano, cuando la población se triplica hasta los 90.000 habitantes.

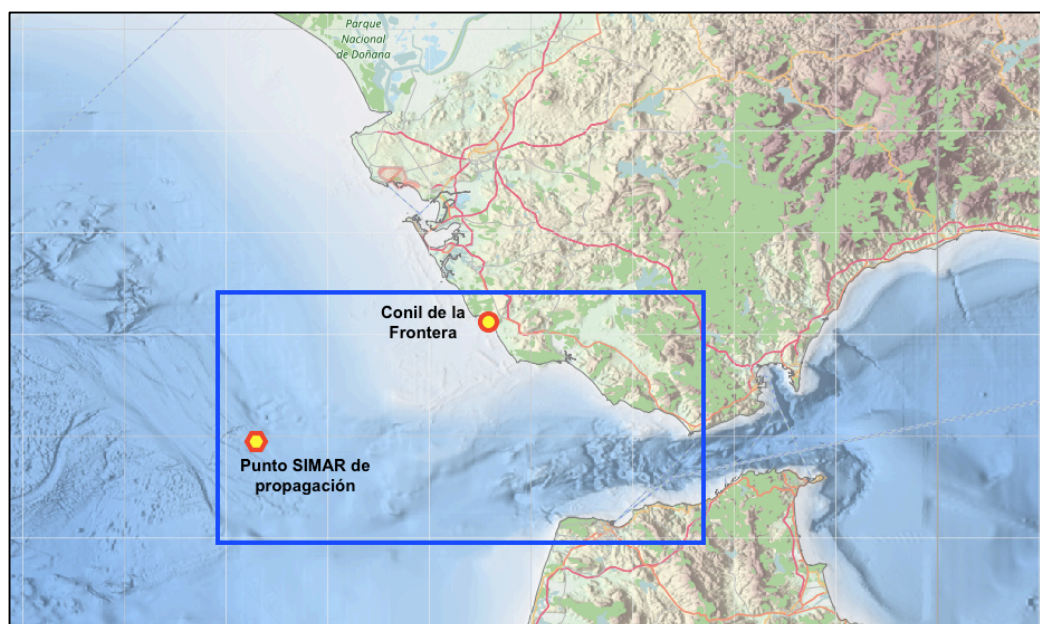
### 3.2 Batimetría

La batimetría es esencial para cualquier estudio en Ingeniería Marítima y Costera, ya que los procesos de propagación de oleaje, concretamente los fenómenos de shoaling y refracción, dependen de los cambios de profundidad en el fondo marino.

Se ha de tener información batimétrica desde el punto SIMAR de propagación de oleaje, situado en aguas profundas, hasta el emplazamiento del arrecife. Los datos batimétricos se tienen en forma de fichero de puntos, y a partir de este se realiza una interpolación para todo el dominio. Por esta razón, es conveniente tener información topográfica (cotas superior a cero) para que la interpolación en el límite costero sea continua y adecuada.

Para la obtención de esta información, se ha recurrido a las siguientes fuentes:

- **Batimetría en aguas indefinidas.** No requiere de un alto nivel de detalle y engloba desde el punto de propagación hasta el inicio de las aguas costeras. Esta información se ha descargado de **EMODnet** (European Marine Observation and Data Network), un servicio online que permite la descarga de batimetría en toda Europa.



**Figura 3-2** Zona de descarga de la batimetría en aguas indefinidas

En la Figura 3-2 se indica, en azul, la zona de información descargada. Engloba desde el punto SIMAR hasta la zona de estudio. Aunque este servicio también ofrece información de las aguas costeras, no presentan suficiente nivel de detalle para obtener un modelo de propagación fiable.

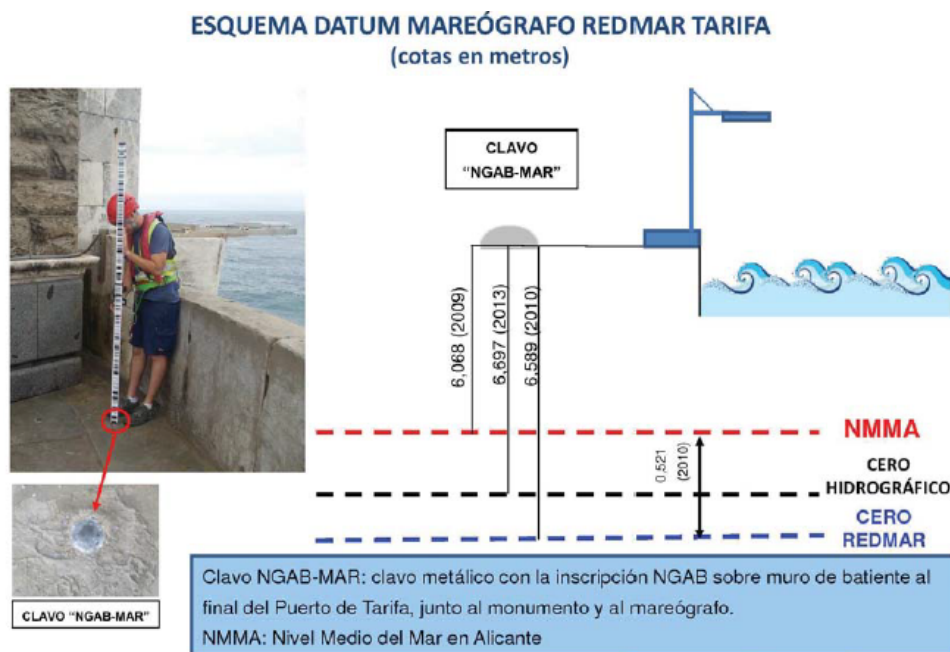
- **Batimetría en aguas costeras.** Como se ha dicho, es esta la información de mayor valor. Cuando se pasa de aguas indefinidas, el oleaje comienza a experimentar los fenómenos de refracción y shoaling, que dependen de los cambios de profundidades. Por esta razón, la batimetría costera ha de tener el mayor nivel de detalle posible. Esta información ha sido obtenida de la cartografía del Ministerio de Fomento, en concreto de una ecobatimetría realizada por este ministerio en 2012.
- **Información topográfica** costera. Solo es necesario una pequeña franja de información topográfica (cotas positivas) para que la interpolación de la profundidad en el límite tenga continuidad. Esta información se ha obtenido a través del servicio de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (**DERA**) de la Junta de Andalucía.

Es importante recalcar que la batimetría viene expresada en condiciones de bajamar máxima viva equinoccial y se ha de tener en cuenta en el siguiente apartado.

### 3.3 Mareas

La propagación del oleaje hasta el arrecife se realizará para diferentes estados de mar. Cada estado de mar contendrá información sobre el nivel del agua referido al NMN. Por ello, es necesario corregir la batimetría existente y expresarla respecto al NMN, unificando así todos los sistemas de referencia.

Para realizar esta corrección, es fundamental un estudio sobre la marea existente en la zona en estudio. Se ha tomado como referencia los datos obtenidos de Puertos del Estado del mareógrafo del puerto de Tarifa (red REDMAR), situado a unos 50 kilómetros del arrecife.



**Figura 3-3** Esquema del mareógrafo del puerto de Tarifa

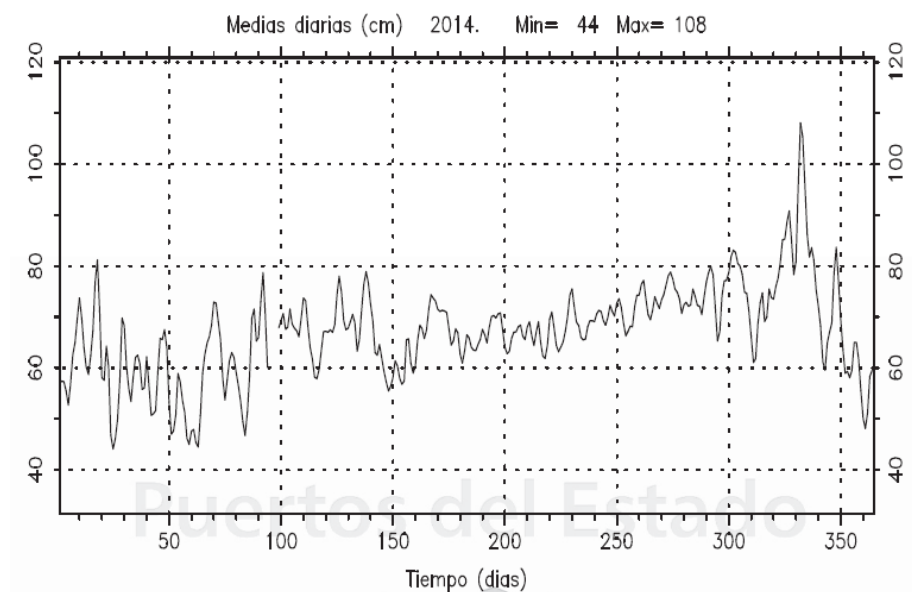
Está situado en el dique del Sagrado Corazón, sobre el paramento del faro y con un brazo horizontal para situarlo sobre la superficie del agua. La transmisión se realiza por GPRS a la Autoridad Portuaria y a Puertos del Estado, enviando datos por correo electrónico cada 5 minutos.

Como paso previo al análisis y explotación de los datos brutos cada 5 minutos proporcionado por el mareógrafo, estos se han sometido a un control de calidad siguiendo los siguientes pasos:

1. Marcado automático de los valores fuera de rango o dudosos.
2. Depuración de los errores.
3. Se ejecuta el programa obteniéndose los datos a intervalos de 5 minutos e interpolando linealmente los datos erróneos.

Una vez depurada la serie, se procede a la realización del análisis armónico y cálculo de los parámetros de interés: niveles medios diarios, niveles extremos mensuales, etc.

Para el año 2014, se obtuvo los siguientes niveles medios:



**Figura 3-4** Niveles medios diarios en Tarifa. Año 2014.

Para conocer la carrera de marea (diferencia entre PMVE y BMVE) son necesarios los niveles extremos. Para el año 2014, se obtuvieron los siguientes valores:

Mes	Máximo	Día	Mínimo	Día
Ene	145,1	(31)	-17,8	(2)
Feb	141	(1)	-22,4	(2)
Mar	146,9	(31)	-29	(1)
Abr	150,5	(2)	0,8	(28)
May	141,5	(17)	-2,8	(29)
Jun	142,4	(16)	1,7	(14)
Jul	147,6	(14)	1,7	(14)
Ago	144,9	(12)	-8,3	(12)
Sep	155,3	(9)	-5,3	(11)
Oct	153,9	(9)	5,7	(8)
Nov	157,9	(28)	-3,1	(7)
Dic	138,9	(4)	-10	(25)
<b>2014</b>	<b>157.9</b>	<b>(28 Nov)</b>	<b>-29.0</b>	<b>(1 Mar)</b>

**Tabla 3-1** Extremos de niveles cada 5 min (cm)

De acuerdo a los valores de la Tabla 3-1, la carrera de marea se obtendría como diferencia de los extremos:

$$C. M. = 157.9 - (-29.0) = 186.9 \text{ cm}$$

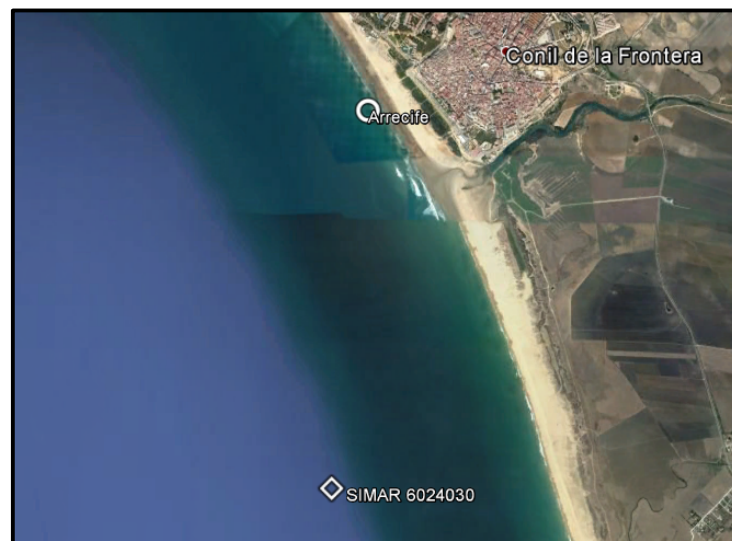
Por tanto, la batimetría existente se ha de corregir sumandole la diferencia entre la BMVE y el NMN, es decir, **0.93 m**.

### 3.4 Clima marítimo

Las condiciones de oleaje son decisivas para el éxito o fracaso de cualquier arrecife artificial para la práctica de surf. Es inútil un buen diseño del arrecife bajo unas condiciones de oleaje desfavorables, entendiéndose como favorables alturas de olas superiores a un cierto umbral (véase 4.2.1) y direcciones hacia la estructura (mar-tierra).

La elección de Conil de la Frontera como emplazamiento para la simulación del arrecife se basa, entre otras razones, en sus óptimas condiciones de oleaje para la práctica de deportes acuáticos como el surf.

Para conocer con detalle sus características, se ha localizado el punto SIMAR de Puertos del Estado más cercano al emplazamiento.



**Figura 3-5** Ubicación del SIMAR 6024030

Los conjuntos de datos SIMAR están formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, **datos simulados** y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

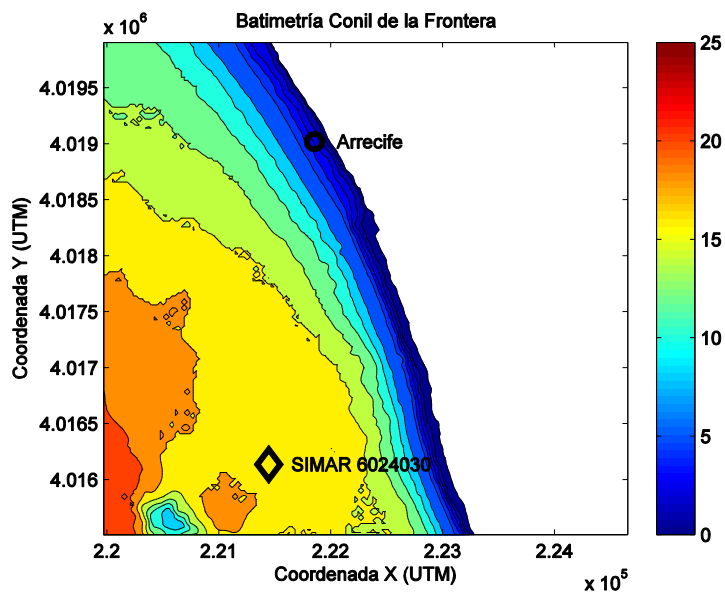
Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. De esta forma, ofrece series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente desde 1958.

Se tiene información de los siguientes parámetros de oleaje:

- Altura significativa espectral.
- Periodo de pico espectral.
- Periodo medio espectral (momentos 0 y 2).
- Dirección media de procedencia del oleaje.
- Altura y dirección de mar de viento.
- Altura, periodo medio y dirección de mar de fondo.

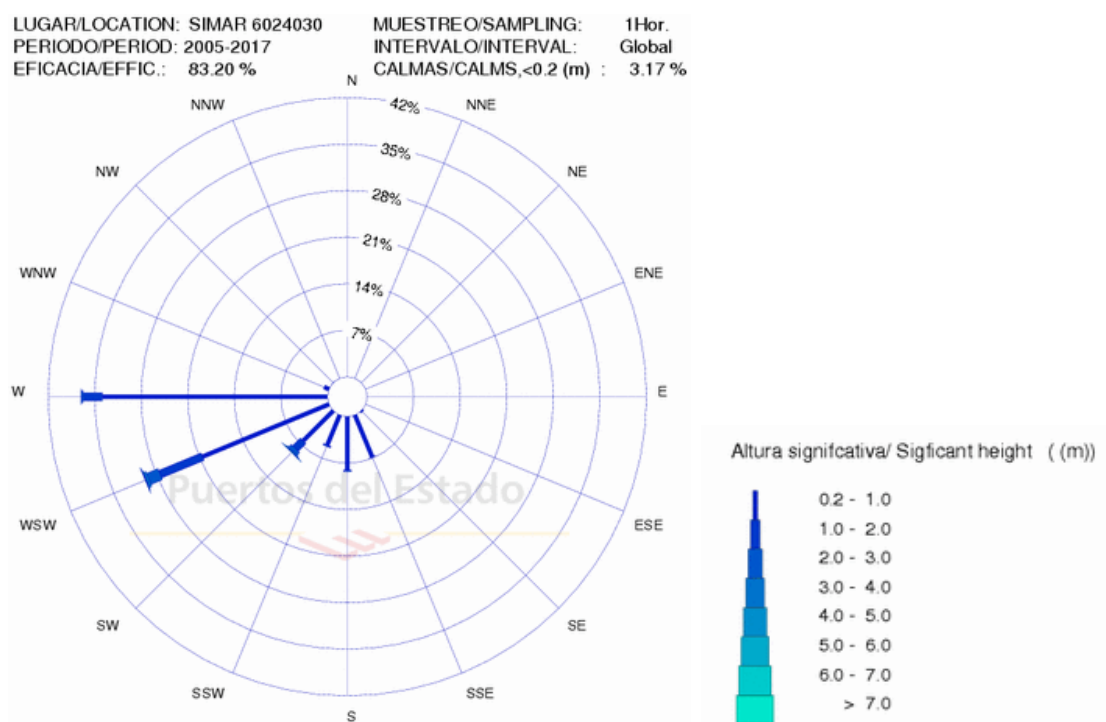
El punto más cercano es el SIMAR 6024030. Se encuentra a unos 1500 m de la línea de costa y a una profundidad de 18 m en NMN. En la Figura 3-6 se observa la batimetría de la zona y las posiciones del arrecife y el punto SIMAR.





**Figura 3-6** Batimetría de la zona de estudio. Posición SIMAR y Arrecife.

La dirección de oleaje predominante de la zona se puede obtener mediante la rosa de oleaje (distribución conjunta de altura de ola/dirección) del punto SIMAR elegido. Esta información nos la proporciona Puertos del Estado y, para el punto SIMAR en cuestión, contiene datos históricos desde 2005 hasta 2017, con toma de muestras horaria.

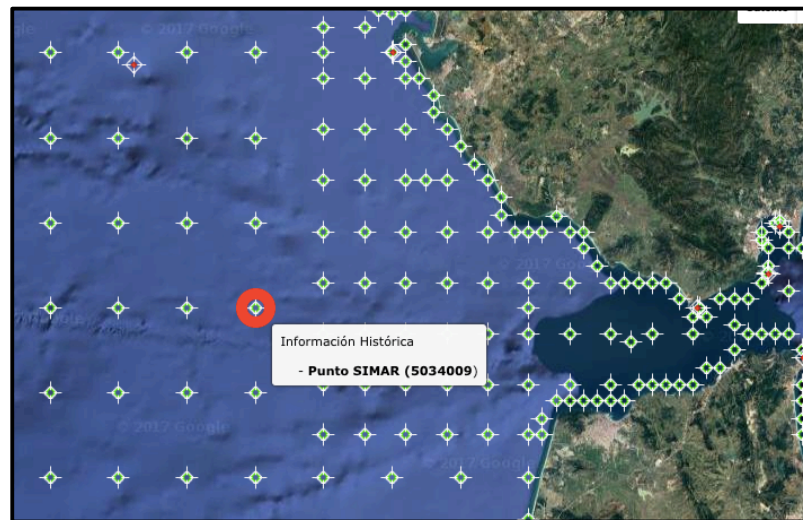


**Figura 3-7** Rosa de altura significativa en SIMAR 6024030 en el periodo 2005-2017



Se observa que en el punto SIMAR elegido la dirección de oleaje predominante es de componente W, con una ocurrencia de más de 35% de las veces. Por otro lado, la dirección de oleaje que genera mayores alturas de olas es de procedencia WSW, con alturas de 3 a 4 metros.

Una vez comprobada que la zona elegida presenta, a priori, buenas condiciones de oleaje para la práctica del surf, se ha de tomar el punto SIMAR desde el que propagar el oleaje. Este punto debe estar situado **en aguas indefinidas**, de manera que los datos oceanográficos de los que se dispongan no hayan sufrido fenómenos de propagación. Se ha elegido el SIMAR 5034009.



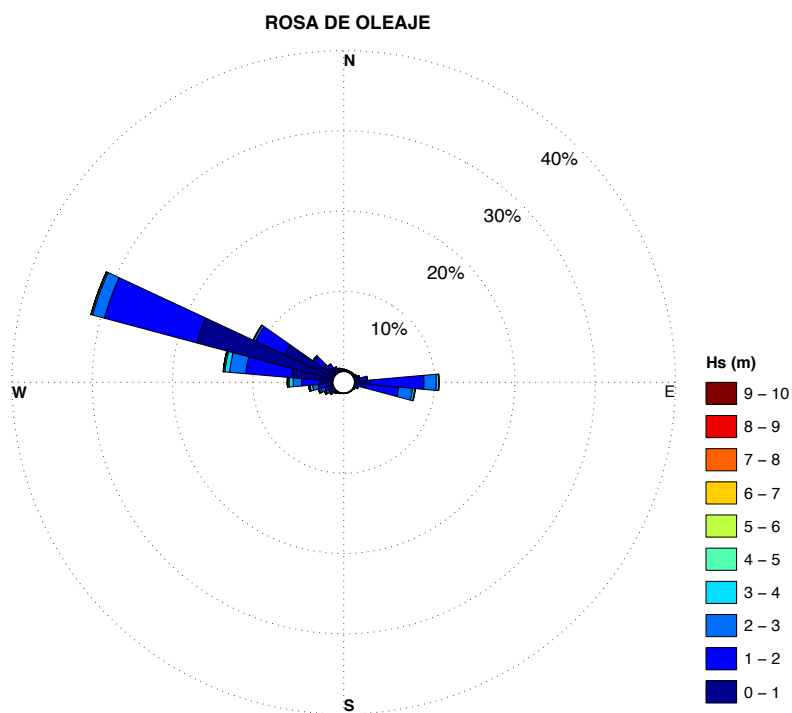
**Figura 3-8** Situación del Punto SIMAR 5034009

La información del punto SIMAR es el indicado en la Tabla 3-2. Contiene un registro de oleaje de 58 años, lo que nos permite definir el oleaje con total fiabilidad.

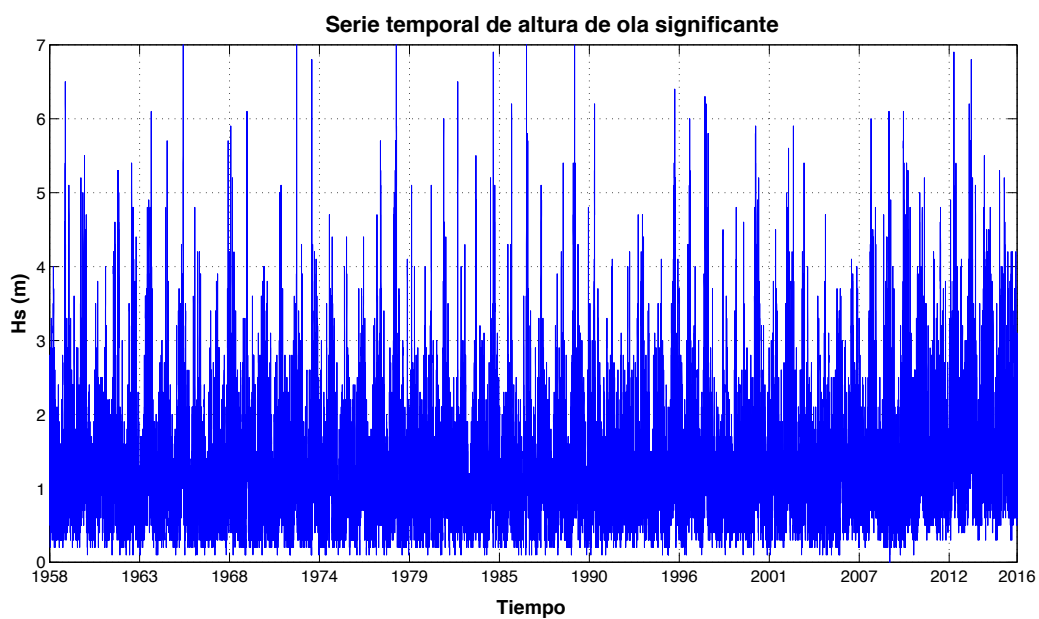
Punto SIMAR de propagación de oleaje	
Longitud	6.67° W
Latitud	36.00° N
Cadencia	1 h
Código	5034009
Inicio de medidas	4 de enero de 1958
Fin de medidas	2 de septiembre de 2016
Profundidad	Indefinidas

**Tabla 3-2** Información del Punto SIMAR 5034009

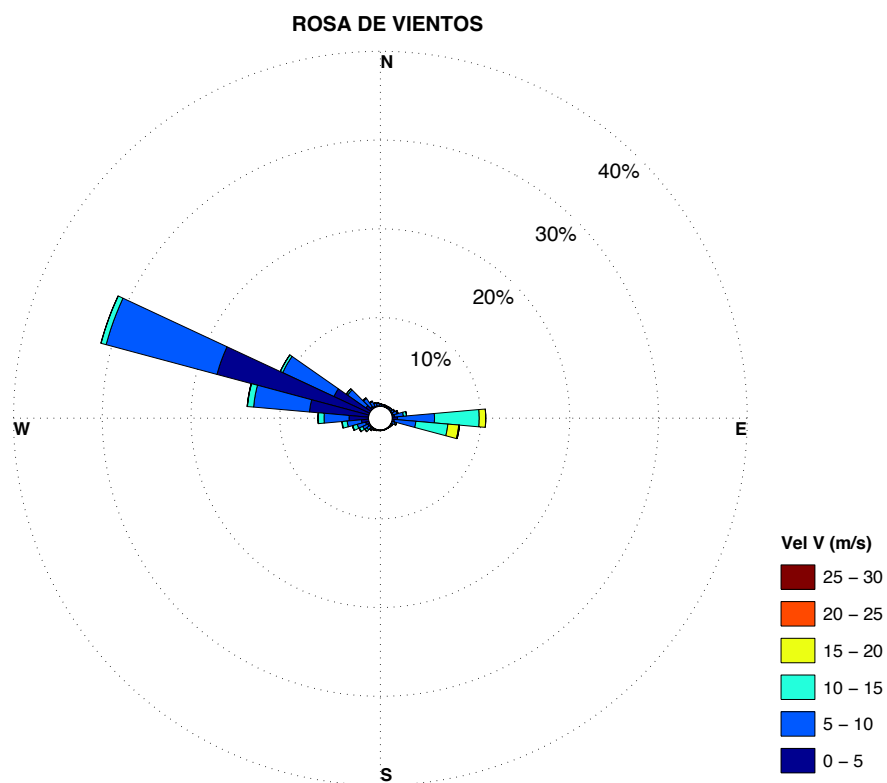
De los datos de dirección media de oleaje ( $\theta$ ) y altura de ola significativa ( $H_s$ ) del registro se construye la rosa de oleaje. La rosa de oleaje (Figura 3-9) permite visualizar fácilmente las direcciones predominantes de oleaje y su intensidad (altura de ola). Análogamente, se ha calculado la rosa de vientos (Figura 3-11).



**Figura 3-9** Rosa de oleaje del SIMAR en aguas indefinidas (1958-2016)



**Figura 3-10** Serie temporal de altura de ola significativa



**Figura 3-11** Rosa de vientos del SIMAR en aguas indefinidas (1958-2016)

De las figuras anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Alturas de ola de hasta 7 m de altura.
- Rango de alturas de olas de mayor frecuencia entre 0,5 y 2,5 m
- La dirección predominante de oleaje es WNW con más de 30% de frecuencia.
- Vientos de procedencia predominante WNW con velocidades de hasta 15 m/s y velocidades máximas de 30 m/s de procedencia E.

## 4 LAS OLAS DE SURF

*Las olas no se miden en pies y pulgadas, se miden en incrementos de miedo.*

*- Buzzy Trent -*

El estudio de los procesos físicos relacionados con las olas de surf comenzaron a principios de los años setenta, cuando se analizaron las rompientes de Hawaii (Walker, J.R.; Palmer, R.Q., 1971) (Walker, y otros, 1972) (Walker, 1974). Los conceptos y directrices de estas primeras publicaciones estuvieron vigente hasta los años 90.

No fue hasta los principios de los 90 cuando comenzaron a desarrollarse modelos de predicción del clima para la práctica del surf, siempre basándose en los parámetros definidos en los trabajos de Walker (Dally, W.R., 1990). El Programa de Arrecifes Artificiales de la Universidad de Waikato en Nueva Zelanda representa un notable avance en el conocimiento de las características de las olas para la práctica de surf, con numerosos artículos de cuyos autores se hará referencia en este capítulo (Andrews, 1997; Hutt, 1997; Mead, 2001; Moores, 2001, Scarfe, 2002, etc.).

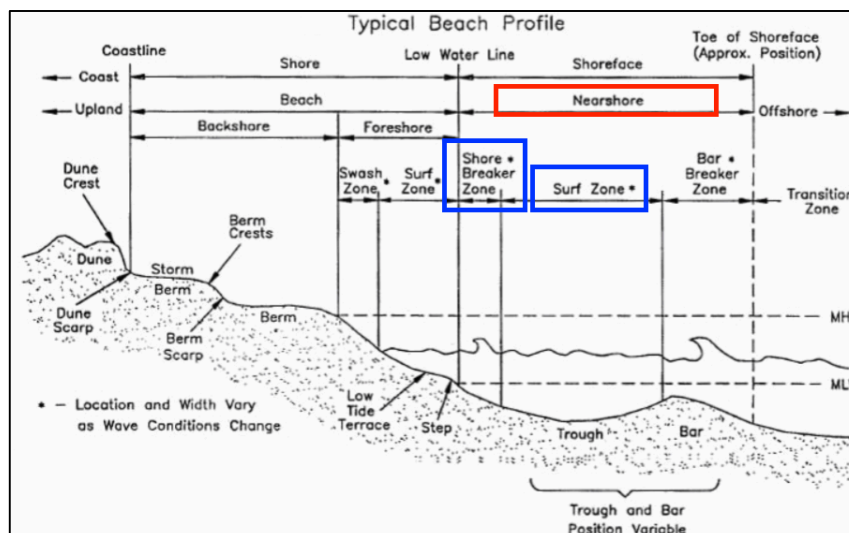
Por otra parte, en España se introdujo por primera vez el concepto de preservación y mejora del surf en el proyecto de regeneración de la playa urbana de la Zurriola (San Sebastián) en 1993 (Gómez Pina, y otros, 1993)

En este capítulo, mediante una recopilación bibliográfica de las publicaciones citadas anteriorente, se analizan las olas de surf y sus características, para poder posteriormente identificarlas como como surfeables o no surfeables. Esta distinción resulta fundamental como punto de partida para conocer que tipo de olas se desean obtener.

### 4.1 Conceptos previos

De ahora y en lo que sigue se hará referencia a conceptos básicos de fenómenos costeros y ciertos principios de la práctica del surf. Por esta razón, se presenta a continuación una pequeña síntesis para facilitar la comprensión al lector.

Como se adelantó en el subcapítulo de Clima marítimo, para caracterizar el oleaje es necesario conocer su periodo  $T$ , altura de ola  $H$  y dirección  $\theta$ . Se suele distinguir dos zonas en el perfil de una playa: zona *offshore* o zona exterior y zona litoral, aunque su delimitación depende ligeramente del autor consultado.

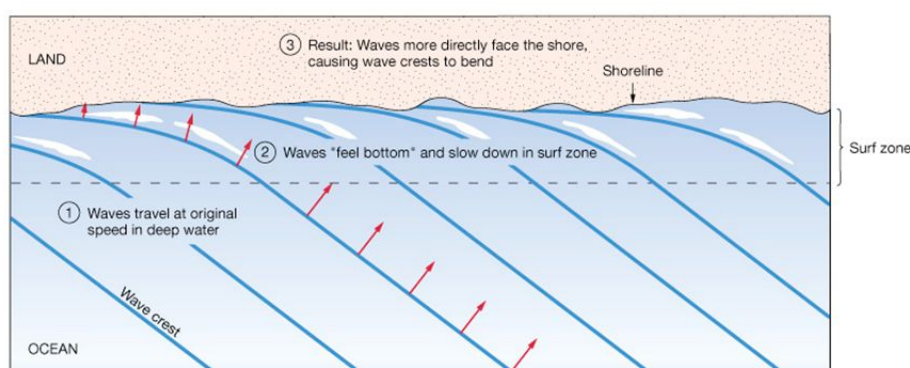


**Figura 4-1** Perfil de playa típico (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

Los trenes de ondas en su aproximación a la costa y ante la presencia de obstáculos, naturales o artificiales, experimentan una serie de fenómenos de propagación:

- Refracción
- Asomeramiento o shoaling
- Difracción
- Reflexión
- Rotura

Los fenómenos de refracción y shoaling comienzan a partir de las denominadas aguas de transición, entre indefinidas y someras, donde el oleaje comienza a tener influencia del fondo marino: el movimiento del agua es restringido por la parte inferior, produciéndose una reducción de la velocidad de la ola en función de la profundidad. El fenómeno de **shoaling** consiste en que la velocidad de la ola disminuye manteniéndose el periodo constante, provocando así una disminución de la longitud de onda, compensada por conservación de energía con un **aumento** de la **altura de la ola**.



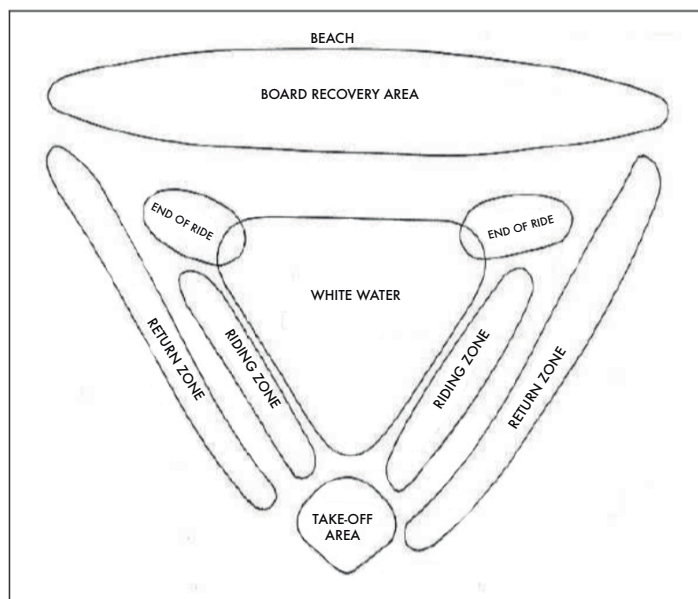
**Figura 4-2** Fenómeno de refracción

En fondos de profundidad variable, dos puntos distintos de un frente de onda tienen profundidades diferentes. Estos puntos, por tanto, se propagarán a diferente celeridad, lo que conlleva a una reordenación de los frentes de onda tendiendo a tomar una dirección paralela a las isobatas. Este es denominado fenómeno de **refracción**.

Por último, los fenómenos de difracción y reflexión no dependen de la profundidad y solo aparecen ante la presencia de un obstáculo que se interpone al paso de la ola. Debido a que las pendientes del arrecife no son elevadas, estos dos procesos serán despreciados en el modelo.

Una vez el oleaje llega a aguas someras, se diferencian dos grandes zonas cerca de la costa (*nearcoast*): la zona de rotura (*breaker zone*) y la zona de surf (*surf zone*). Vease de nuevo la Figura 4-1.

Una vez en la zona de rotura, (MOFFAT, y otros, 1981) presentaron un esquema simple de las diferentes partes que lo componen.



**Figura 4-3** Esquema de las zonas típicas de surf ( MOFFAT, y otros, 1981)

El esquema comienza en la zona del *take-off*, lugar donde se coge la ola. Dependiendo de si el descrestamiento es hacia la izquierda o derecha, existen dos *riding zone*, que es la zona de recorridio del surfista. Una vez finalizada la maniobra, el surfista vuelve al a zona de *take-off* por el exterior, *return zone*.

## 4.2 Parametros de surfeabilidad

Como se indicó en el capítulo anterior, la práctica del surf requiere de unas condiciones determinadas de oleaje para su viabilidad, además de otros factores como la habilidad del surfista. Por ello, es necesario establecer una serie de criterios para conocer la aptitud de una ola para ser surfeada. Dependerá, por tanto, no solo de la ola, sino también del surfista: no todas las olas son surfeables, y las que lo son, no todas pueden ser surfeadas por cualquier nivel de surfista.

Existen cuatro tipologías principales de surf con tamaños de tablas diferentes y cada una de ellas requiere oleajes sensiblemente diferentes. Estos son *short boarding*, *long boarding*, *body boarding* y *body surfing*.

Los surfistas de *short boards* emplean tablas de seis a siete pies y se caracterizan por maniobras rápidas y agresivas. Para los *long boarders* son más apropiadas olas largas y suaves propias de las playas californianas, ya que sus tablas varían entre los siete y once pies de longitud. Los surfistas de *body boarding* utilizan tablas pequeñas de unos tres pies de largo, por lo que generalmente no se ponen de pie: toman las olas tumbados o parcialmente levantados con el estilo denominado *drop knee*. Por último, los *body surfers* no utilizan tablas, sino que surfean las olas con su propio cuerpo.

En este trabajo se ha optado por estudiar las olas específicamente para la práctica de *short boarding*, por ser ésta la más popular y en la que se centran la mayoría de las investigaciones científicas en la materia. No obstante, los conceptos que se explicarán son aplicables a todo tipo de olas de surf.

Existen numerosas publicaciones que describen multitud de parámetros para definir científicamente las olas. Ante tal variedad de parámetros, (Scarfe, y otros, 2003) resume los cuatro parámetros principales que pueden caracterizar toda ola:

- Altura de ola en rotura ( $H_b$ )
- Peel angle ( $\alpha$ )

- Intensidad de rotura de la ola ( $B_I$ )
- Longitud de sección de la ola ( $S_L$ )

El resto de parámetros existentes no son más que derivaciones de estos cuatro parámetros enunciados.

#### 4.2.1 Altura de ola en rotura ( $H_B$ )

La altura de ola es comúnmente considerada como uno de los parámetros más importantes ya que es determinante en la operatividad de la ola (capacidad para ser surfada). En oceanografía, y para el estudio que sigue, la altura de ola se mide desde la cresta hasta el seno de la misma. Los surfistas suelen emplear métodos notablemente diferentes para medir la ola, por lo que ha de asegurarse de emplear un único sistema de referencia.

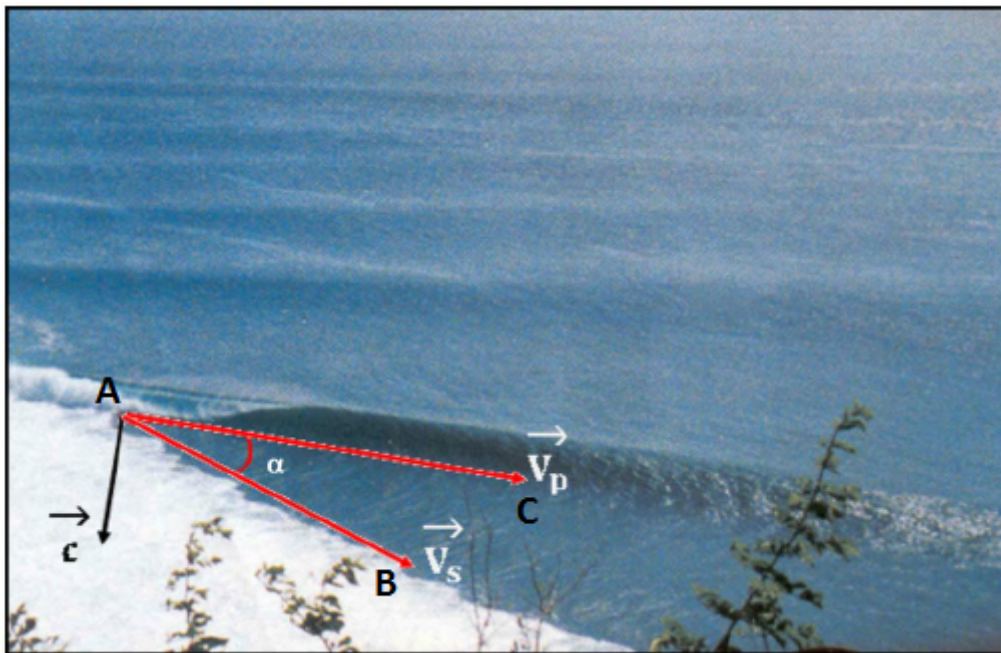
Dado que las olas vienen en tandas, los surfistas tomarán aquellas mayores de cada tanda. Por este motivo, (Hutt, 1997) recomienda el uso de la altura de ola media del 10% de olas mayores ( $H_{1/10}$ ) para medir estadísticamente las olas de surf, en lugar de la altura de ola significativa ( $H_{1/3}$ ).

Los límites de altura de ola surfables fueron establecidos por (Mack, 2003) entre 1 y 20 m, aunque a partir de 4 metros su dificultad aumenta considerablemente.

#### 4.2.2 Peel Angle ( $\alpha$ )

El *peel angle* de la ola es, junto a la altura de ola, el parámetro más crítico para determinar si una ola puede ser surfable o no.

Se define el *peel angle* como aquel existente entre la línea de rotura (estela de la ola rota A-B) y el frente de onda (la línea tangente a la cresta de la ola en el punto de rotura A-C), variando entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .



**Figura 4-4.** Peel angle ( $\alpha$ ) y sus vectores de velocidades

Los parámetros del *peel angle* son los que se muestran en la Figura 4-4. La ola en primer lugar rompe en la posición del punto A. Una vez rota, avanza dejando la estela de espuma hasta el punto B. En el punto A, la ola tiene una velocidad de propagación  $\vec{c}$ , perpendicular a la cresta. Por otro lado, la velocidad de rotura  $\vec{V}_p$  es la velocidad a la que rompe la ola. El vector resultante  $\vec{V}_s$ , suma de estas dos velocidades, es aproximadamente la velocidad que experimentaría el surfista si permaneciese en la zona de rotura.

En definitiva, el *peel angle* refleja como de rápido la rotura de ola avanza lateralmente a lo largo de la cresta. Los surfistas deben sufrir al menos a esta velocidad de rotura para poder permanecer frente al punto de rotura.



Por tanto, cuanto menor sea el *peel angle*, más rápida será la rotura. En caso de que toda la cresta rompa simultáneamente, el ángulo de rotura es de 0° y se denomina un *closeout*. Esta situación únicamente es interesante para los surfistas que se aventuran por primera vez a este deporte, pues solo pueden surfear olas rotas, pero no son deseables para el resto de surfistas.

Con el objetivo de poder conocer la dificultad de surfear las olas en función del peel angle y la altura de ola, (Hutt, y otros, 2001) definió una clasificación universal con criterios de surfistas expertos de diferentes partes del mundo. La escala varía de 1 a 10, siendo 1 para surfistas totalmente principiantes y 10 surfistas profesionales.

Clasificación	Descripción	Límite del Peel Angle	Min-Max Hb (m)
1	Principiante que no es capaz de deslizarse por la ola. Solo se mueve según la dirección de avance de la ola.	90°	0.70-1.00
2	Capaz de surfear lateralmente a lo largo de la cresta de la ola	70°	0.65-1.50
3	Capaz de generar velocidad impulsándose en la cara de la ola	60°	0.60-2.50
4	Iniciándose y realizando maniobras sencillas ocasionalmente.	55°	0.55-4.00
5	Capaz de realizar maniobras sencillas continuamente en una única ola	50°	0.5-4.00+
6	Capaz de realizar maniobras sencillas continuamente en una única ola. Realiza maniobras difíciles en ocasiones.	40°	0.45-4.00+
7	Surfista avanzado que es capaz de realizar maniobras difíciles sin problemas.	29°	0.4-4.00+
8	Profesional que es capaz de realizar maniobras difíciles sin problemas.	27°	0.35-4.00+
9	Top 44 surfistas profesionales	Sin límite	0.3-4.00+
10	Surfistas en el futuro	Sin límite	0.3-4.00+

**Tabla 4-1** Clasificación según el Peel Angle y la Altura de ola

#### 4.2.3 Intensidad y tipo de rotura de ola (B<sub>i</sub>)

Existe una gran cantidad de trabajos realizados sobre los diferentes tipos de rotura y su forma. Una de las conclusiones fundamentales es que la forma de rotura de una ola viene determinada principalmente por la batimetría.

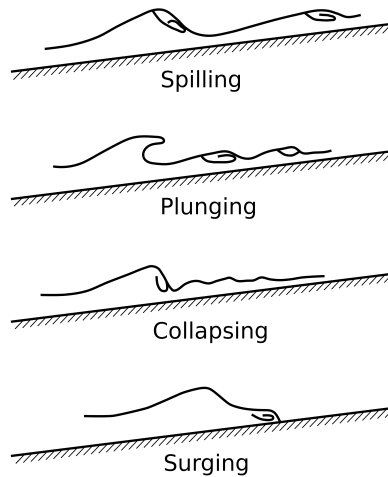
El tipo de rotura es uno de los factores más importantes en el surf. (Patrick, y otros, 1954) establecieron tres tipos de rotura:

- **Spilling.** La cresta se va desmoronando poco a poco, finalizando con una rotura en descrestamiento. (Dally, 1989), profesor y surfista, considera este tipo de oleaje bueno para el surf, incluso óptimo para un surf moderado. Este tipo de rotura es conocido en terminología surfista como *mushi*.
- **Plunging.** La parte superior de la ola avanza, balanceándose y cayendo delante de la ola produciendo una voluta. Este tipo de rotura es considerado el ideal para la práctica del surf, aunque para surfistas



algo más “radicales”. Es conocido como *tube* o *hollow* entre los surfistas.

- **Collapsing.** Este tipo de rotura fue añadido posteriormente por (Galvin, 1968). La cresta se mantiene intacta y escalonada en la parte frontal, cayendo de una vez posteriormente. Es una rotura irregular y turbulenta no apta para el surf.
- **Surging.** En este caso, tanto la cresta como la cara frontal se mantienen intactas y avanza hacia la playa. Igualmente, no es apta para la práctica del surf. Estos dos últimos tipos de rotura se conocen como *cruncher*.



**Figura 4-5** Tipos de rotura de ola

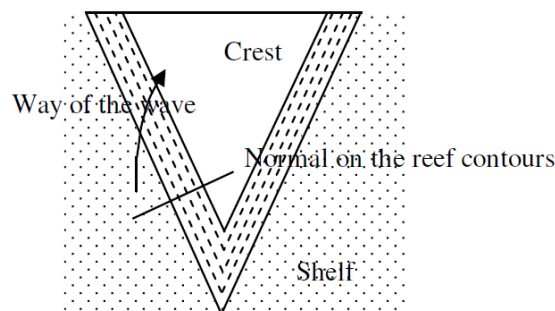
Iribarren define un parámetro conocido como **número de Iribarren** o parámetro de similitud para describir el tipo de rotura. Se trata de un método rápido y clásico:

$$\xi_b = \frac{s}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$

Siendo,

- $\xi_b$  número de Iribarren
- $s$ : pendiente del fondo
- $H_b$ : altura de ola en rotura
- $L_0$ : longitud de onda en aguas profundas

En este caso la pendiente del fondo  $s$  es la pendiente que la ola experimenta en su avance, y no la pendiente correspondiente a la normal a las líneas de contorno del arrecife.



**Figura 4-6** Pendiente según el avance de la ola en comparación con la recta de máxima pendiente del talúd

Este parámetro proporciona una estimación del tipo de rotura, según se indica en la Tabla 4-2:

NÚMERO DE IRIBARREN	FORMA DE ROTURA	SURFEABILIDAD
$\xi_b < 0,4$	Spilling	Bueno
$0,4 < \xi_b < 2$	Plunging	Idóneo
$\xi_b > 2$	Surging/Collapsing	No apto

**Tabla 4-2** Forma de Rotura según Número de Iribarren

Para calcular la **intensidad de rotura**, (Mead, 2001c) muestra una relación directa con el gradiente vertical del fondo:


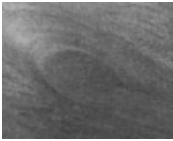


$$Y = 0.065X + 0.821$$

Siendo,

- Y: la intensidad de rotura o índice del vórtice.
- X: el gradiente ortogonal del fondo según la dirección de avance de la ola.

Este método de cálculo, aunque simple, es de gran valor para obtener el diseño de arrecifes artificiales con éxito.

(Hutt, 1997) realizó la clasificación mostrada en la Tabla 4-3, que relaciona la intensidad de rotura con el tipo de rotura:

Índice Vórtice	Descripción	Intensidad	Ej. Rotura	Ej. Perfil Rotura
1.6-1.9	Square, spitting	Extrema	Pipeline, Shark Island	
1.91-2.2	Very hollow	Muy alta	Backdoor, Padang	
2.21-2.8	Pitching, hollow	Alta	Kirra Point, Off-The-Wall	
2.81-3.1	Steep faced, but rarely tubing	Media	Bells Beach, Bingin	

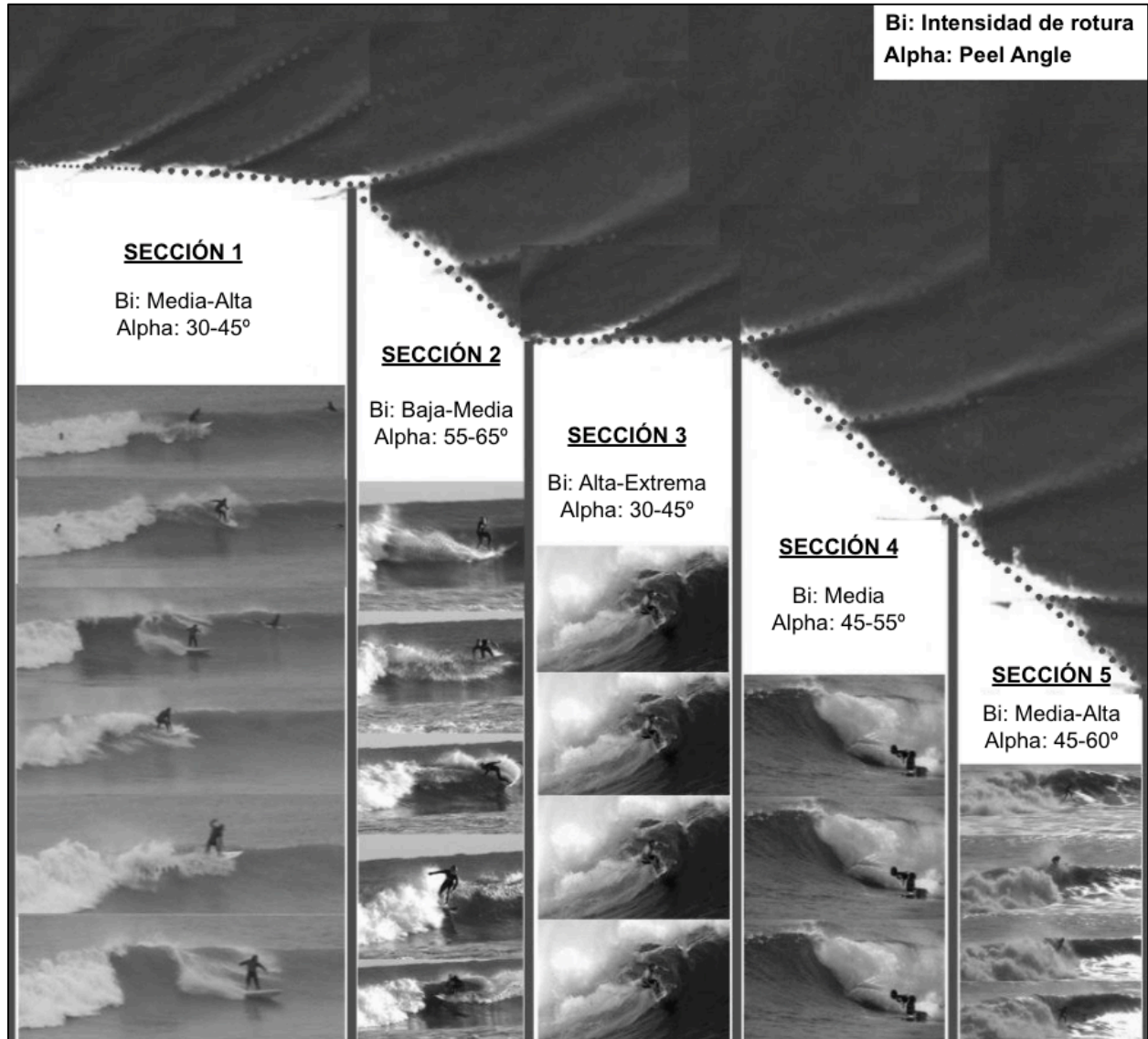
**Tabla 4-3** Clasificación de Hutt según la intensidad de rotura

La intensidad de rotura, como se verá en capítulos posteriores, desempeña un papel fundamental en el tipo de maniobra a realizar por el surfista.

#### 4.2.4 Longitud de la sección de ola ( $S_L$ )

La llegada de oleaje irregular y el efecto de la batimetría también irregular suele originar la rotura de la ola en tramos o secciones. Se considera que comienza una nueva sección cuando existe un cambio en la altura de ola ( $H_b$ ), el ángulo de rotura ( $\alpha$ ) o intensidad de rotura ( $B_i$ ) y se dice que tiene una longitud de  $S_L$ .

El cambio de secciones a lo largo de la cresta de la ola resulta de gran atractivo para los surfistas, siendo desafiante para ellos el paso de una a otra y, además, les permite realizar diferentes maniobras en cada una de ellas.



**Figura 4-7** Ejemplo de diferentes tipos de secciones en una ola de surf

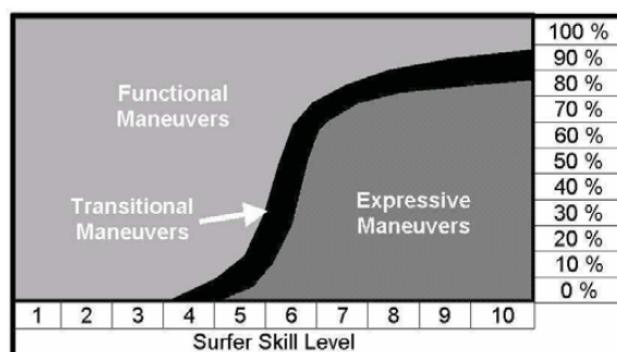
#### 4.3 Maniobras de surf

Realizar maniobras mientras se hace surf es el objetivo de la mayoría de los surfistas. Los tipos de maniobras dependen de la habilidad, estilo del surfista y del tipo de ola.

(Scarfe, 2002) definió tres tipos de maniobras principales: funcional, expresivo y transitorio. Las maniobras funcionales son aquellas totalmente necesarias para poder tomar una ola, como puede ser coger velocidad para mantenerse en la misma. Las maniobras catalogadas como expresivas se ejecutan por diversión y disfrute del

surfista, como son las maniobras aéreas<sup>1</sup>. Por último, para pasar de una maniobra funcional a expresiva se emplean maniobras transitorias como el *bottom turn*<sup>2</sup> y *top turn*<sup>3</sup>.

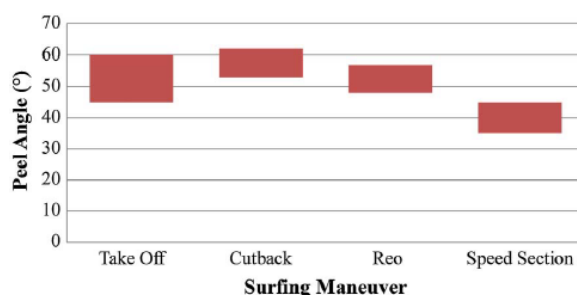
Cada maniobra puede ser catalogada como funcional, expresiva o transitoria según las circunstancias en las que se realice. Un *bottom turn* puede ser funcional cuando se toma la ola, transitoria cuando sea preparativo para una aérea y expresiva bajo otras condiciones.



**Figura 4-8.** Relación entre el porcentaje del tipo de maniobra que ejecuta un surfista y su nivel. (Scarfe, 2002)

La categoría de las maniobras también dependerán del nivel del surfista, ya que una maniobra sencilla y funcional para un surfista experto puede ser una maniobra expresiva para un principiante. La Figura 4-8 refleja además que los surfistas de bajo nivel realizan un alto porcentaje de maniobras funcionales mientras que los expertos ejecutan mayores maniobras expresivas.

El análisis del *peel angle* para ciertas maniobras es de gran utilidad para obtener un criterio de diseño en los arrecifes artificiales. Así, se podrá estimar que tipo de maniobra se podrán realizar en un arrecife conociendo los *peel angle* potenciales que presentará.



**Figura 4-9.** Rango de los peel angle apropiados para cada maniobra (Scarfe, 2002)

Como se anticipó en el apartado 4.2.3, la intensidad de rotura está completamente relacionada con el tipo de maniobra. Para un *peel angle* determinado, un surfista podrá realizar un *top turn* en una ola con mediana intensidad de rotura, un *reo*<sup>4</sup> si la intensidad de rotura es mayor o un *tubo*<sup>5</sup> sólo si la intensidad de rotura es extrema.

<sup>1</sup> Maniobra que consiste en aprovechar la velocidad para deslizarte por la pared de la ola y saltar por encima de la misma.

<sup>2</sup> Es el primer giro que se realiza después del take off y sirve para surfear la pared de la ola y aprovecharla al máximo.

<sup>3</sup> Giro realizado tras el *bottom turn* en la parte superior de la pared de la ola para volver a bajarla.

<sup>4</sup> *Reo*, *re-entry* o *off the lip* es una maniobra en la que se encara la pared de la ola a punto de romper y se rebota contra ella.

<sup>5</sup> Consiste en recorrer el interior de una ola cuando esta rompiendo en forma de tubo. Es la maniobra más espectacular.

## 5 DISEÑO DEL ARRECIFE

*El misterio es la cosa más bonita que podemos experimentar. Es la fuente de todo arte y ciencia verdadera.*

*- Albert Einstein -*

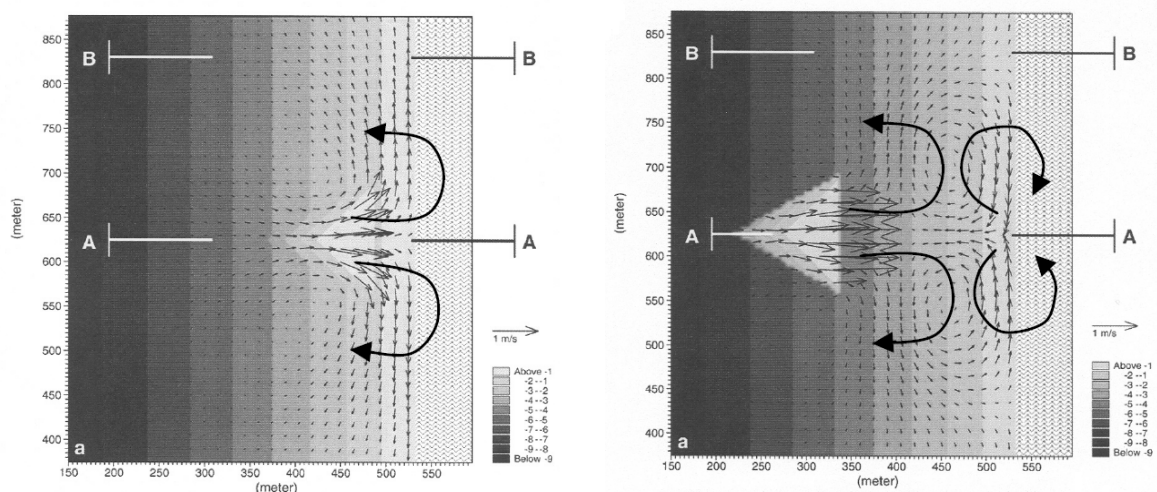
**E**n este capítulo se introducen las principales características de diseño que ha de tener un arrecife artificial de forma que su implantación genere las olas de mayor calidad posible para los surfistas y, además, tenga en cuenta la protección de la playa.

Se estudiarán aspectos de diseño como la posición, geometría, orientación, pendiente, altura, etc. en términos generales para cualquier arrecife artificial y en particular para el arrecife a modelar situado en Conil de la Frontera, Cádiz (España).

Se pretende, por tanto, obtener un primer modelo de arrecife con el que comenzar a simular el oleaje y a partir del mismo sacar conclusiones sobre posibles mejoras y optimización de su diseño.

### 5.1 Posición

El primer aspecto que se ha de considerar es la posición que tendrá el arrecife, es decir, la distancia desde el mismo hasta la línea de costa. (Ranasinghe, y otros, 2006) estudiaron la influencia de éstas distancia con la afección a la costa. Concluyeron que si la distancia es lo suficientemente grande (Figura 5-1 izq.), se forman cuatro celdas de corrientes en lugar de dos (Figura 5-1 der.). Estas cuatro celdas colaboran en la **acreción** de la playa, mientras que de existir solo dos celdas prevalece la **erosión**.



**Figura 5-1.** Formación de dos celdas (izq. 100 m) y cuatro celdas (der. 250 m).

Estos autores propusieron una relación empírica a modo de análisis preliminar para predecir la respuesta de la

línea de costa ante una estructura sumergida como el arrecife.

$$\frac{S_a}{SZW} = \begin{cases} > 1.5 & \text{Acreción} \\ < 1.0 & \text{Erosión} \end{cases}$$

Siendo:

- $S_a$  la distancia desde la línea de costa hasta la punta del arrecife.
- $SZW$  la anchura de la zona natural de surf (*natural surf zone width*).

La zona de surf suele variar entre 100 y 150 m, por lo que imponiendo un coeficiente de 1.8, se obtiene una distancia  $S_a$  para el arrecife a modelar de unos 220 m.

Bajo estas condiciones, la punta del arrecife estaría posicionada a una profundidad de 4.7 m respecto a NMN.

## 5.2 Geometría

Una vez ubicado el arrecife respecto a la línea de costa, falta definir los aspectos principales en cuanto a su geometría: forma, ángulo de abertura y perfil.

Estos parámetros de diseño serán decisivos en la forma de romper el oleaje y por tanto en la surfeabilidad de las olas. Se trata, por tanto, de una de las decisiones más importantes para lograr los objetivos planteados en este TFM. Para abordar este capítulo, se han recopilado numerosas publicaciones de investigación sobre estos aspectos y sus influencias en la rotura del oleaje.

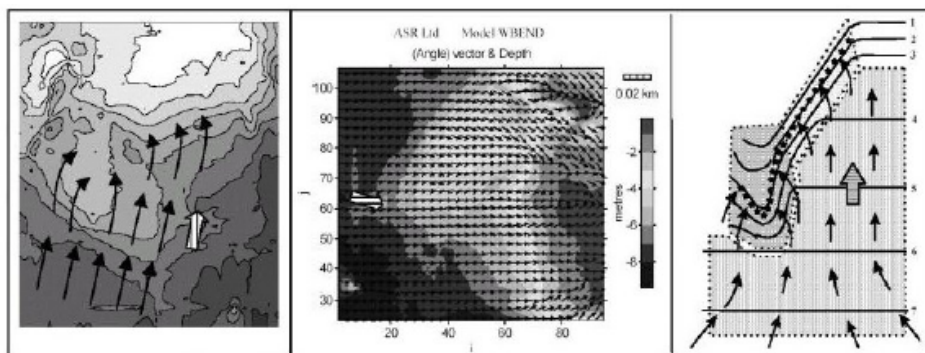
### 5.2.1 Forma del arrecife

Cada arrecife puede requerir diferentes requisitos en cuanto a su forma en función de las condiciones climáticas de la zona, exigencias de los surfistas, condiciones de protección de la costa, etc. No hay, por tanto, una forma definitiva y única que podamos adoptar en la totalidad de los casos.

Hoy en día existen numerosos diseños de arrecifes que funcionan correctamente y otros muchos que, debido principalmente a su forma, no generan rotura de oleaje con las características deseadas. Para aumentar las posibilidades de éxito, (Mead, 2001a) adopta formas con una gran similitud con los mejores arrecifes naturales del mundo, aquellos cuyas olas son conocidas entre los surfistas como *World-Class*.

Se utilizan, principalmente, dos formas en los arrecifes artificiales que se asemejan a los naturales:

1. Forma de **niveles múltiples** (*multi-level reefs*). Presenta una estructura muy similar al arrecife de Bingin, Bali. Genera olas con *peel angles* adecuados en un amplio rango de la carrera de marea.



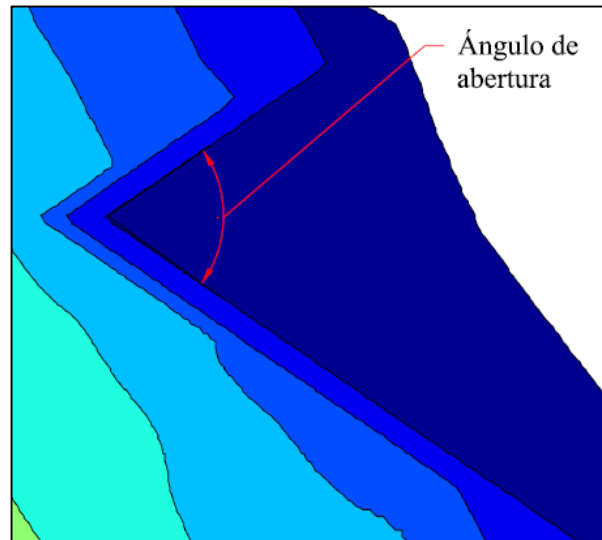
**Figura 5-2.** Arrecife de Bingin. De izquierda a derecha – Batimetría; modelo numérico con la refracción sobre el arrecife; esquema simple del arrecife. (Mead, S.T. and Black, K.P., 2001b)

2. Forma de **delta** (*delta shape reefs*). Esta forma se asemeja al famoso arrecife de Pipeline, Banzai (Hawaii). Es considerada como una de las mejores playas del mundo para la práctica del surf.

Se adoptará, por tanto, una forma que reproduzcan los arrecifes naturales que generan las mejores olas de surf del mundo: una combinación de forma de delta con taludes que simulan el esquema de arrecife de niveles múltiples de la Figura 5-2.

### 5.2.2 Ángulo de abertura

Se entiende como ángulo de abertura aquel que forman las dos alas o aspas del arrecife, como se muestra en el siguiente croquis.



**Figura 5-3** Definición del ángulo de abertura

Resulta evidente que el ángulo del reef debería tener una relación directa con el *peel angle*, y por tanto desempeña un papel fundamental en la surfeabilidad de la ola. (Voorde, 2009) realizó numerosas pruebas de surfeabilidad con arrecifes cuyos ángulos comprendían entre 45° y 66° para dos condiciones de oleaje: situación normal y de tormenta.

En condiciones de tormenta, los arrecifes con 45° proporcionaban líneas de roturas mayores, permitiendo a los surfistas mayores recorridos. En cuanto al *peel angle*, tanto en situaciones normales como de tormentas, los arrecifes de 66° generan olas apropiadas para surfistas amateur-intermedios (*peel angles* medios-altos, según Tabla 4-1).

Se simularán, por tanto, dos arrecifes con 45° y 66° para conocer con exactitud, de acuerdo a los resultados que se obtengan, la surfeabilidad de las olas generadas.

### 5.2.3 Altura y profundidad

La profundidad del arrecife es la distancia que existe entre el punto más alto del arrecife (su meseta) y la superficie del agua. Esta profundidad vendrá determinada por dos factores muy simples:

1. Debe ser lo suficientemente somero para que el oleaje rompa en el arrecife.
2. Debe ser lo suficientemente profundo para asegurar la seguridad de los surfistas.

Se ha tomado una profundidad de **1,5 metros** respecto al NMM<sup>6</sup>, cumpliéndose:

1. Se estima que las olas mayores de 0,75 m rompan al llegar al arrecife, de acuerdo al criterio de rotura de McCowan:

$$H_b = \gamma_b \cdot h_b = 0.5 \cdot 1.5 = 0.75 \text{ m}$$

<sup>6</sup>NMM: Nivel medio del mar. Corresponde al nivel medio del mar en un cierto periodo en la zona de estudio.

Donde:

- $H_b$  es la altura de ola en rotura.
- $h_b$  es la profundidad en rotura.
- $\gamma_b$  parámetro de rotura, aproximadamente 0,5 para ola significativa.

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 4-1, alturas de ola de 0,75 comienzan a ser apropiadas y surfeables incluso para los surfistas principiantes.

2. En condiciones de NMM, una profundidad de 1,5 m es sobradamente suficiente para la seguridad de los surfistas. En condiciones extremas desfavorables, las correspondientes a BMVE<sup>7</sup>, la profundidad sería de unos 60 cm que, si bien no se garantiza el punto anterior, sigue siendo una distancia prudencial.

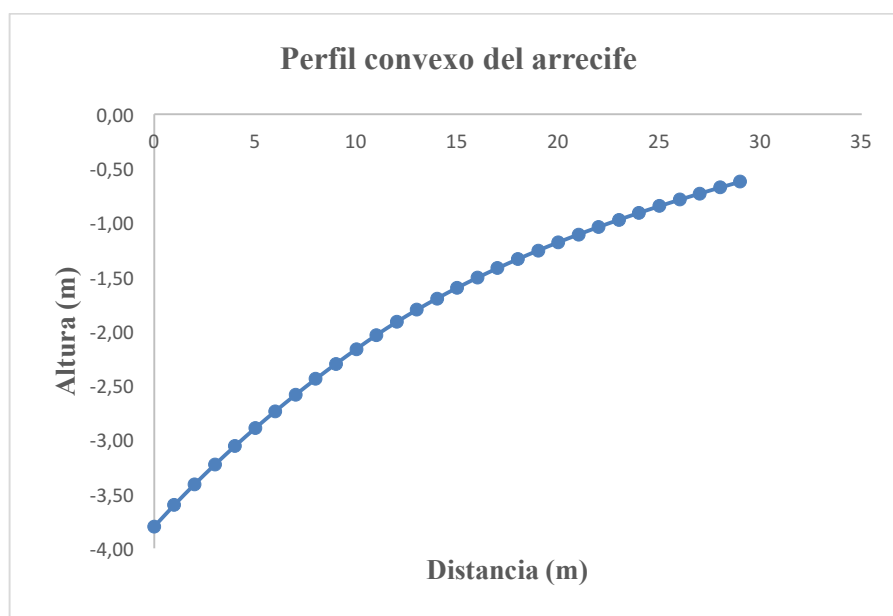
Por último, la altura del arrecife es la distancia vertical entre el pie y la cabeza del talud del mismo. Se ha tomado una altura de 3,2 m (véase croquis de la Figura 5-9), según el perfil del arrecife que se obtiene en el apartado siguiente.

#### 5.2.4 Perfil del arrecife

Para la definición del perfil del arrecife se ha de tener en cuenta no solo su efectividad para provocar la rotura del oleaje en buenas condiciones para la práctica del surf, si no también su viabilidad constructiva.

En numerosos estudios se han adoptado perfiles con pendiente constante con relación 1:10 (V:H) con resultados satisfactorios (Mendonça, y otros, 2012). No obstante, para mantener la intensidad de rotura constante en un mayor rango de estados de mar es favorable un diseño de un perfil con forma convexa: pendientes variables desde 1:5 en el pie del talud hasta 1:20 en la cabeza del mismo (Hearing, 2006).

Bajo esta premisa, se ha obtenido el siguiente perfil:



**Figura 5-4** Perfil del convexo arrecife. El gradiente del perfil disminuye conforme desciende la profundidad.

<sup>7</sup> BMBE: Bajamar máxima viva equinoccial. Corresponde al valor mínimo del nivel debido a la onda de marea para mareas vivas cerca del equinoccio.



X	Z	Pendiente
0	-3,80	1 : 5
1	-3,60	1 : 5,3
2	-3,41	1 : 5,5
3	-3,23	1 : 5,8
4	-3,06	1 : 6,1
5	-2,89	1 : 6,3
6	-2,74	1 : 6,6
7	-2,58	1 : 6,9
8	-2,44	1 : 7,1
9	-2,30	1 : 7,4

X	Z	Pendiente
10	-2,16	1 : 7,687
11	-2,03	1 : 8,3
12	-1,91	1 : 8,9
13	-1,80	1 : 9,5
14	-1,70	1 : 10,1
15	-1,60	1 : 10,8
16	-1,50	1 : 11,4
17	-1,42	1 : 12,0
18	-1,33	1 : 12,6
19	-1,25	1 : 13,2

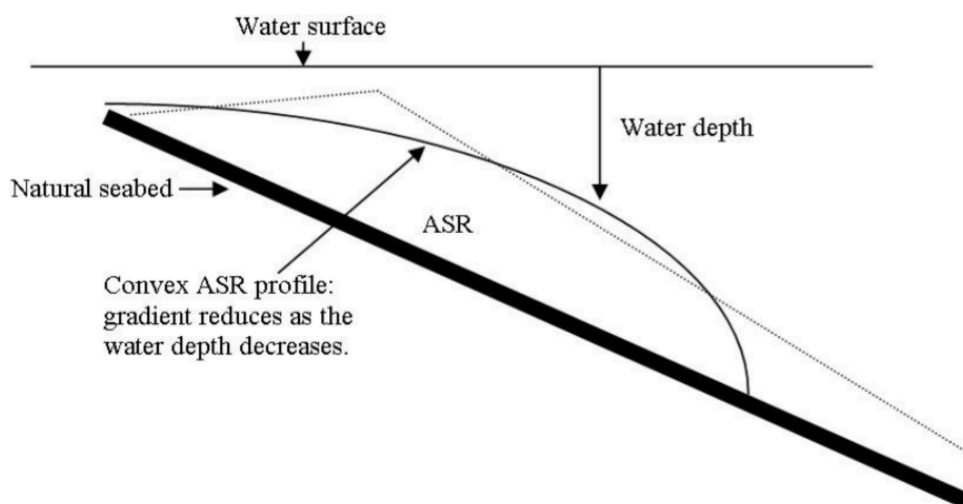
X	Z	Pendiente
20	-1,18	1 : 13,8
21	-1,11	1 : 14,5
22	-1,04	1 : 15,1
23	-0,97	1 : 15,7
24	-0,91	1 : 16,3
25	-0,85	1 : 16,9
26	-0,79	1 : 17,5
27	-0,73	1 : 18,2
28	-0,67	1 : 18,8
29	-0,62	1 : 19,4
30	-0,57	1 : 20,0

**Tabla 5-1** Pendientes del perfil

La Tabla 5-1 muestra la variación de pendientes desde el pie del talud, a una profundidad de 3,8 m (véase 5.1) hasta la cabeza del talud a una profundidad de 0,57 m. Estos valores de profundidades están referidos a la BMVE, pues es el sistema de referencia que se ha empleado en los datos de batimetría. Es por ello que la profundidad de la meseta del talud es de 0,57 m en lugar de los 1,5 m que se decidió tomar en el apartado 5.2.3. Esta corrección realizada por el efecto de la marea se detalló en el capítulo 3.3.

El perfil convexo, además de los beneficios para la surfeabilidad desarrollados hasta ahora, presenta las siguientes ventajas:

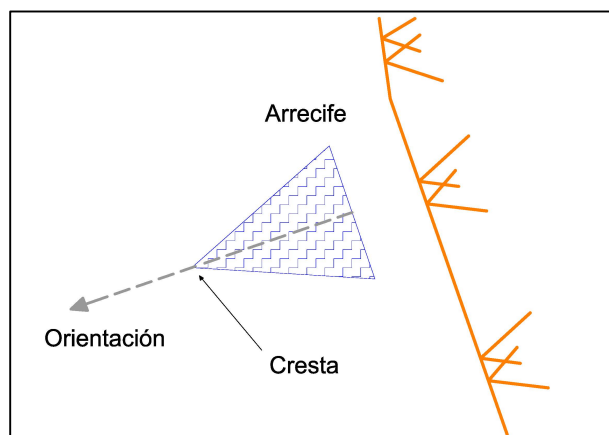
- Menor complejidad en su construcción.
- Mejora de la estabilidad del arrecife.
- Ahorro de material en la construcción



**Figura 5-5** Croquis del perfil convexo del arrecife (Black, y otros, 2009)

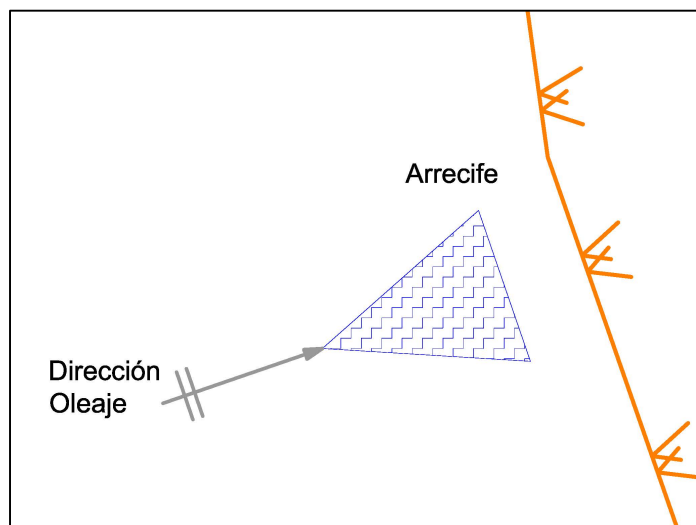
### 5.3 Orientación

Una vez definidos los aspectos de diseño del arrecife y su ubicación respecto a la línea de costa, falta únicamente por establecer su orientación hacia aguas profundas.



**Figura 5-6** Croquis orientación del arrecife

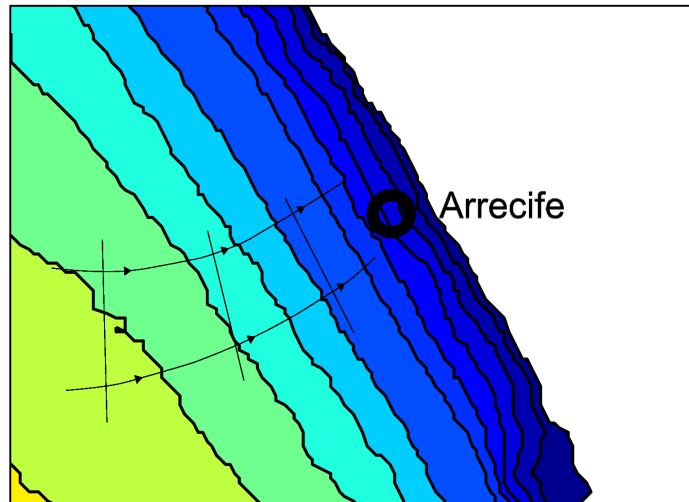
Se trata, por tanto, de escoger la mejor orientación del arrecife para que maximice sus posibilidades de éxito en el mayor de los casos posibles. El funcionamiento óptimo del arrecife se dará cuando el ángulo de incidencia de la ola respecto al vértice sea de  $0^\circ$  (Voorde, y otros, 2008), como se muestra en la Figura 5-7.



**Figura 5-7** Arrecife con ángulo de incidencia de oleaje de  $0^\circ$

La orientación será, por tanto, aquella en la que la cresta esté dirigida hacia la dirección de oleaje predominante en la zona en estudio, según se vio en el capítulo 3.4 de clima marítimo.

A priori, de acuerdo a la Figura 3-7, la orientación óptima del arrecife sería en dirección W, pues es la dirección de mayor ocurrencia (más de un 35%). Sin embargo, dado que el punto SIMAR y la línea de costa distan unos 1500 m, es previsible que el oleaje siga refractándose. Es decir, al propagarse hasta el arrecife, los frentes de onda tenderán a alinearse con la línea de costa.



**Figura 5-8** Esquema de refracción desde el SIMAR hasta el arrecife

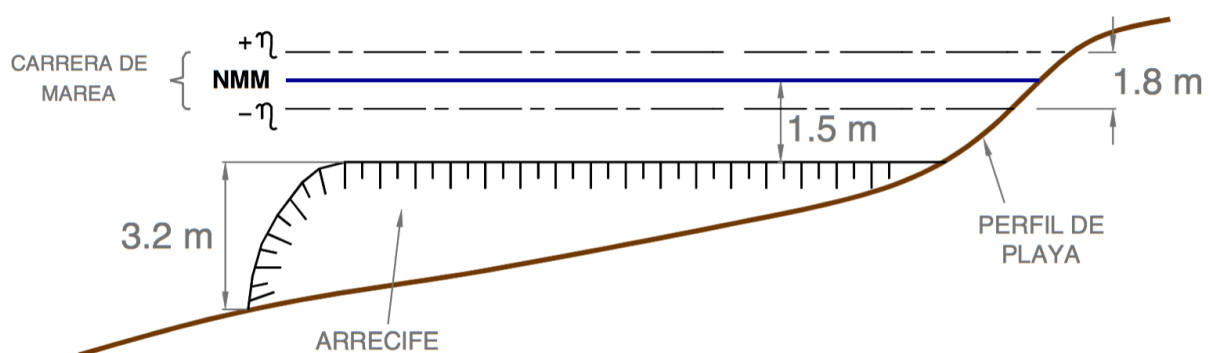
Debido a este fenómeno de refracción previsible, se optará por una orientación de la cresta perpendicular a la línea de costa, coincidente con la dirección WSW de la rosa de oleaje. Además, es ésta la dirección con mayores alturas de olas significante (Figura 3-7).

## 5.4 Conclusión

Teniendo en cuenta lo expuesto en los capítulos anteriores, se ha concluido simular dos arrecifes, variando el ángulo de abertura de  $45^\circ$  a  $66^\circ$ , que reúnen las siguientes características:

Parámetros de diseño del arrecife	
Posición	<i>Distancia cresta-línea de costa de 220 m</i>
Forma	<i>Delta</i>
Ángulo de abertura	<i><math>66^\circ - 45^\circ</math></i>
Perfil	<i>Convexo</i>
Orientación	<i>WSW – Perpendicular a las líneas batimétricas</i>

**Tabla 5-2** Resumen parámetros de diseño del arrecife



**Figura 5-9** Croquis de la sección del arrecife diseñado

## 6 METODOLOGÍA

*If you want to model nature, you must copy nature  
If you want to copy nature, you must understand nature.  
- Ib. A. Svendsen -*

**E**n este capítulo se detalla la metodología de cálculo empleada para lograr los objetivos del trabajo, desde la modelización del arrecife hasta la obtención de los parámetros de surf, pasando por la propagación del oleaje desde aguas indefinidas hasta la zona de estudio.

### 6.1 Introducción

El primer paso antes de comenzar la modelización y cálculo del arrecife es establecer su vida útil. La elección de la vida útil se ha realizado ajustándose al tiempo en que se prevé en servicio la estructura. Para su valoración se tiene en cuenta la posibilidad, facilidad y factibilidad económica de las reparaciones, la probabilidad y posibilidad de cambios en las circunstancias y condiciones de utilización previstas (ROM 0.2-90)

La ROM 0.2-90 establece las siguientes vidas útiles mínimas según el tipo de obra marítima y el nivel de seguridad requerido:

TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
OBRA DE CARÁCTER GENERAL	<b>25</b>	50	100
OBRA DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

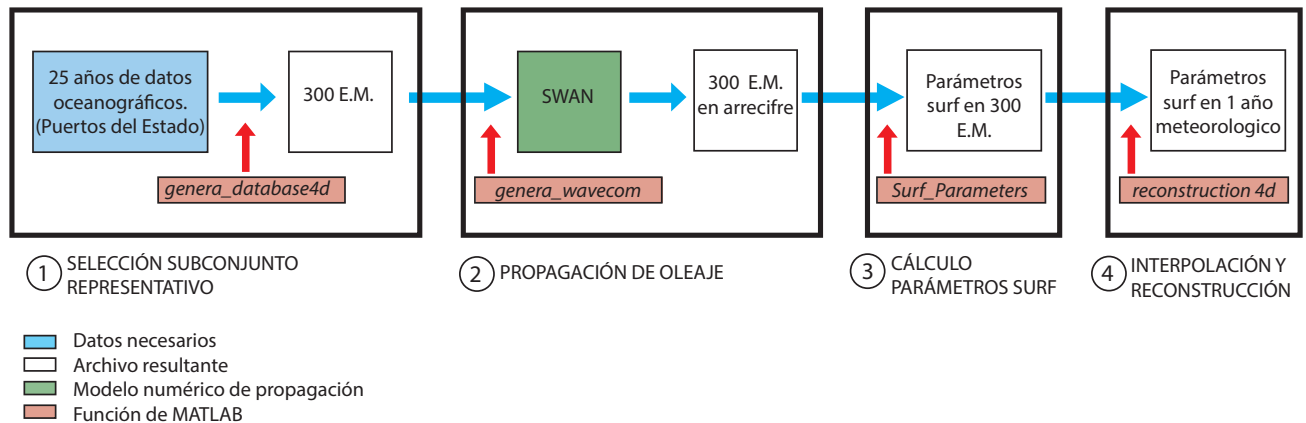
**Tabla 6-1** Vidas útiles mínimas en años

El arrecife sería una obra de carácter general, es decir, no está ligado a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto, y con un nivel de seguridad 1, con pequeños riesgos de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. Por tanto, la vida útil a considerar será de 25 años.

Una vez definida la vida útil del arrecife, el proceso a seguir será el siguiente:

- 1) Selección subconjunto representativo de 300 estados de mar a partir de 25 años de datos.
- 2) Propagación de los 300 estados de mar desde el punto SIMAR al arrecife.
- 3) Cálculo de los parámetros de surf para los 300 estados de mar.
- 4) Interpolación de los parámetros de surf para cualquier periodo de tiempo deseado del registro histórico.

Para avanzar en el proceso de un paso a otro se han empleado funciones de MATLAB<sup>®</sup>, cuyos funcionamientos serán objeto de este capítulo. La Figura 6-1 resume el proceso completo.



**Figura 6-1** Esquema de la metodología de cálculo

Como se adelantó en capítulos anteriores, el **punto fuerte** de esta **metodología** de cálculo y pilar básico de este trabajo consiste en **evitar la propagación** de toda la serie de datos que se desee analizar. Es decir, si se desea conocer la viabilidad de un arrecife para 5 años, no es necesaria la propagación de 5 años de estados de mar, sino únicamente los estados de mar del subconjunto elegido.

El proceso de propagación de oleaje mediante métodos numéricos conlleva un alto coste computacional que para largas series de datos puede resultar inviable. Por esta razón, esta metodología pretende ofrecer una nueva herramienta para el diseño de arrecifes artificiales.

## 6.2 Modelo numérico

La propagación de oleaje se ha calculado numéricamente mediante el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Es un modelo de propagación de oleaje espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde aguas indefinidas hasta zonas costeras. Es ampliamente utilizado en aplicaciones ingenieriles de Ingeniería Marítima, especialmente cuando es necesario propagar oleaje sobre grandes superficies oceánicas.

Entre sus utilidades más destacadas están:

- Cálculo de transporte de sedimentos
- Propagación de régimen medio
- Obtención de cota de inundación
- Estudio de la morfodinámica litoral

En este caso se empleará únicamente para la propagación de oleaje hasta el arrecife. Durante la propagación, SWAN tiene en cuenta, principalmente, los siguientes procesos:

- Asomeramiento por cambios de profundidad y corrientes. El asomeramiento por corrientes cobra especial relevancia en las desembocaduras, pero es de escasa importancia en nuestro caso. Solo se considerará el inducido por la batimetría.
- Refracción. De nuevo, solo se considerará el producido por la batimetría.
- Difracción. Tiene escasa importancia en nuestro caso, y solo puede ser modelada en sentido restringido: modifica las velocidades de propagación por un factor que depende de la energía del espectro.
- Disipación por fondo.
- Rotura.

- Disipación por descrestamiento (whitecapping).
- Presencia de obstáculos

Por otro lado, presenta las siguientes limitaciones:

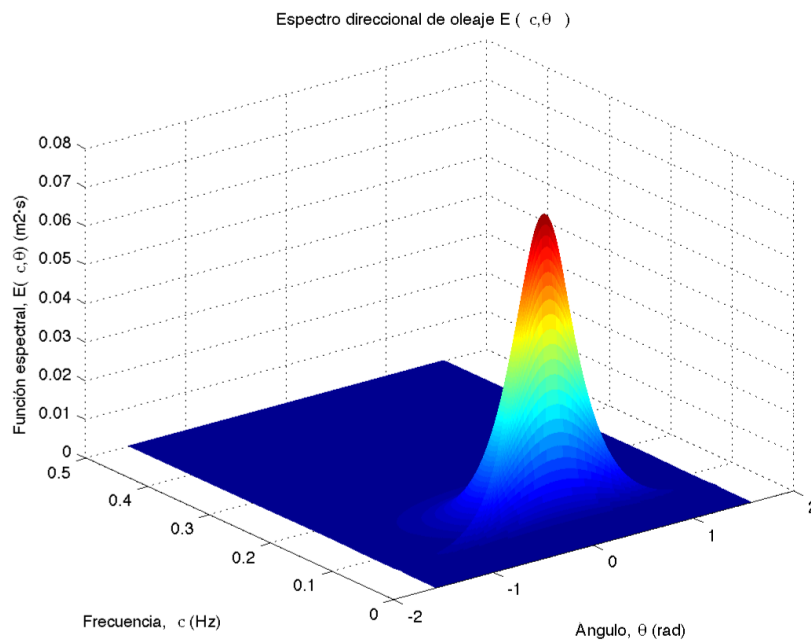
- El hecho de que la difracción sea modelada en sentido restringido disminuye su precisión.
- No tiene en cuenta la reflexión.
- No calcula corrientes inducidas por el oleaje.

Esto implica que el modelo dará buenos resultados para el caso en estudio, pues ninguno de los fenómenos que presentan limitaciones son relevantes para nuestro caso: no existen grandes obstáculos ni construcciones que produzcan gran difracción durante la propagación ni cambios bruscos de profundidad que indujeran reflexión.

### 6.2.1 Fundamentos teóricos

SWAN utiliza el concepto de espectros de oleaje para la propagación. Los espectros de oleaje son el conjunto de todas las frecuencias ( $\sigma$ ) y direcciones ( $\theta$ ) de las que se compone el oleaje. Es decir, analiza el oleaje asumiendo que éste consiste en la suma de infinitos componentes armónicos de frecuencias, amplitudes y direcciones distintas.

La función de densidad espectral  $E(\sigma, \theta)$  representa la energía total asociada a cada uno de los trenes de onda del espectro según su frecuencia y dirección.



**Figura 6-2** Ejemplo de un espectro direccional de oleaje  $E(\sigma, \theta)$  tipo swell

En SWAN el oleaje es descrito mediante la densidad espectral de acción de onda ( $N$ ) que se relaciona directamente con la densidad espectral de energía ( $E$ ):

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (6-1)$$

Siendo la ecuación de gobierno que resuelve el modelo la siguiente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (6-2)$$

Donde:

- $c_x$  y  $c_y$  representa las velocidades de propagación en el espacio geográfico.
- $c_\sigma$  representa velocidad de propagación en el espacio de frecuencias  $\sigma$ .
- $c_\theta$  representa velocidad de propagación en el espacio direccional  $\theta$ .
- $S$  es el término fuente de energía.

En cuanto al sentido físico de sus componentes, de izquierda a derecha, representan:

- (I): Variación local
- (II) y (III): Propagación espacial con la velocidad
- (IV): Variación de frecuencia del espectro por variaciones de profundidad
- (V): Término de refracción
- (VI): Términos fuente: generación y disipación.

Los términos fuente comprenden la transferencia de energía entre viento y oleaje (en nuestro caso no se considerará la acción del viento) y disipación por whitecapping, fricción del fondo, rotura por profundidad, etc.

### 6.3 Modelización

La modelización de la estructura resulta fundamental para lograr una simulación cuyos resultados se asemejen lo más posible a los que se obtendrían en la realidad. Para ello, se habrá de formular, programar y aplicar modelos avanzados para el cálculo, considerando la interacción fluido-estructura.

El dominio de estudio abarcará una gran superficie, pues no se centrará únicamente en el arrecife, sino en toda la batimetría existente desde el punto de propagación de oleaje (punto SIMAR) hasta la línea de costa.

SWAN es capaz de discretizar el dominio espacial en mallas que pueden anidarse. Los datos de oleaje se prescriben en una o varias de las aristas de la malla de mayor superficie, mientras que las mallas anidadas tomarán los datos del espectro interpolado en la ejecución de la malla anterior, como se muestra en la Figura 6-3.



**Figura 6-3** Discretización espacial en mallas para el caso en estudio

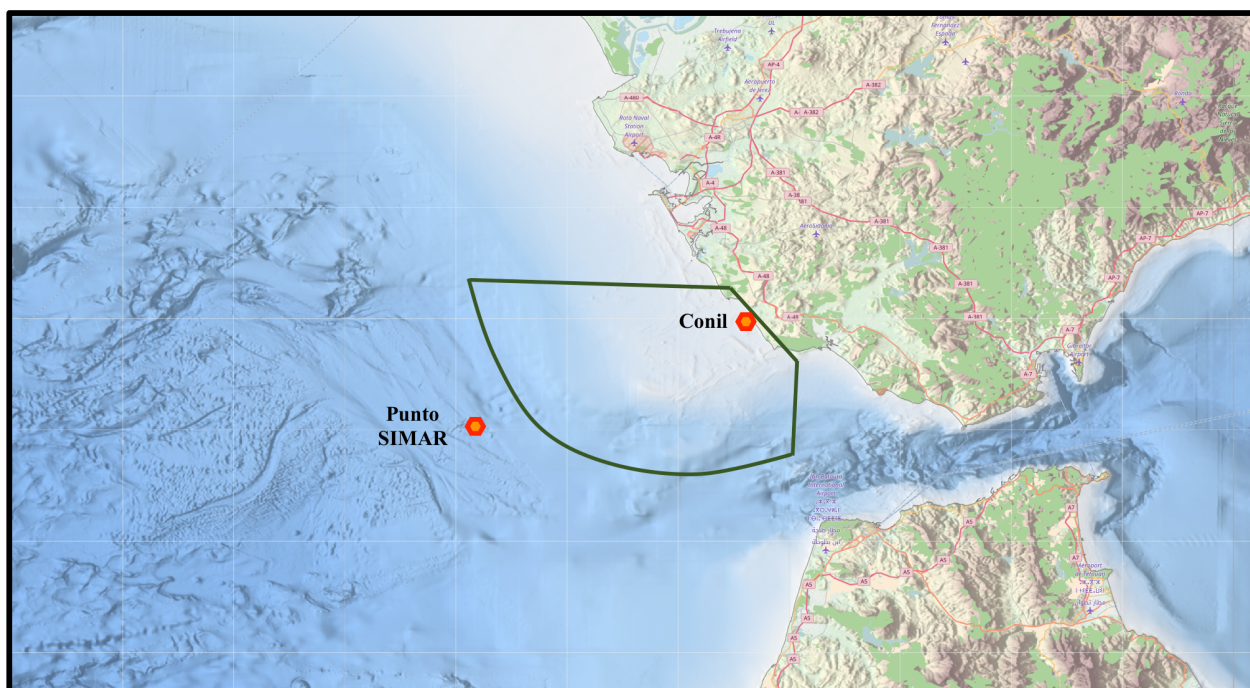


### 6.3.1 Grid y anidamiento

La discretización se modelará mediante tres mallas o grid: desde la mayor que abarcará todo el dominio hasta la menor que tendrá capacidad de detalle sobre el arrecife, con resoluciones cada vez mayores.

#### Malla 1

La primera malla, la de mayor extensión, se ha definido mediante un tramo circular orientado de forma que abarque el mayor rango de direcciones de oleaje posible, junto con tres tamos rectos, según se observa en la Figura 6-4.



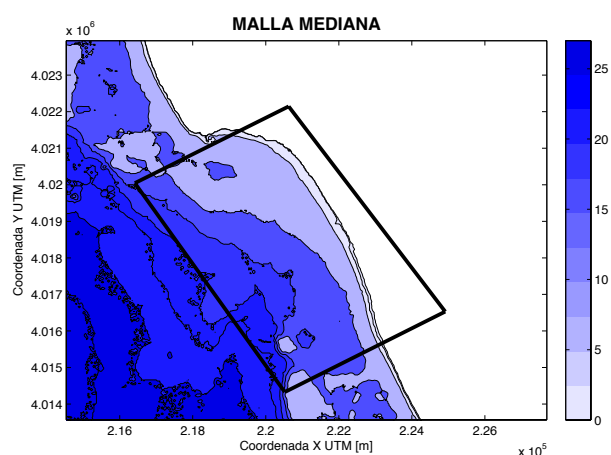
**Figura 6-4** Dominio de la Malla 1

Al ser la primera malla, no es preciso un alto nivel de detalle, por lo que se ha optado por tamaños de celdas en el peor de los casos de unos 300-400 metros. El contorno circular es el de mayor longitud, unos 83 km, y por tanto el que presentará menor resolución. Así pues, se ha optado por un mallado de 243x243 celdas, que implicarán tamaños de celda máximos de unos 340 metros.

#### Malla 2

La segunda malla presenta forma rectangular y está anidada en la malla 1, es decir, toma los datos del espectro interpolado anteriormente. Se ha tomado una resolución de 162x162 celdas, pero al ser sus contornos de mucha menor longitud que la malla anterior, su resolución será mayor.

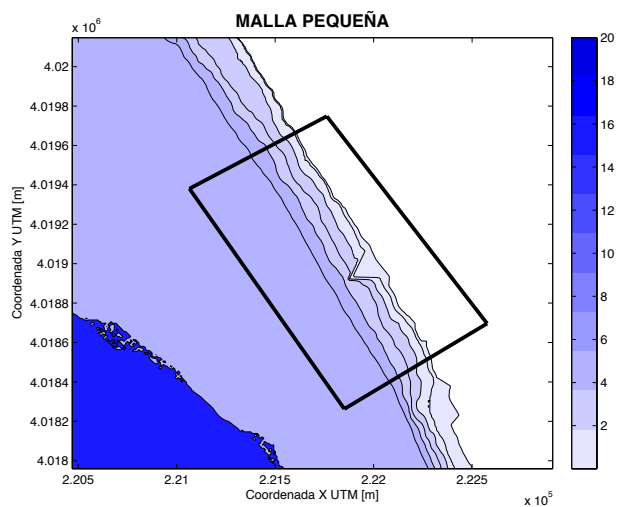




**Figura 6-5** Dominio de la Malla 2

### **Malla 3**

Se trata de la última malla y abarca únicamente la extensión del arrecife. Debe presentar el mayor nivel de detalle posible para que pueda representar fielmente la geometría del arrecife incluso la convexidad del perfil del mismo. Se ha realizado un mallado de 243x243 celdas, con tamaños de celdas resultantes menores de 2 metros.



**Figura 6-6** Dominio de la Malla 3

En la Tabla 6-2 se resumen las características de cada malla.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Mallado	243x243	162x162	243x243
Long. contorno (m)	83000	20200	470
Long. celda (m)	341	124	1,9

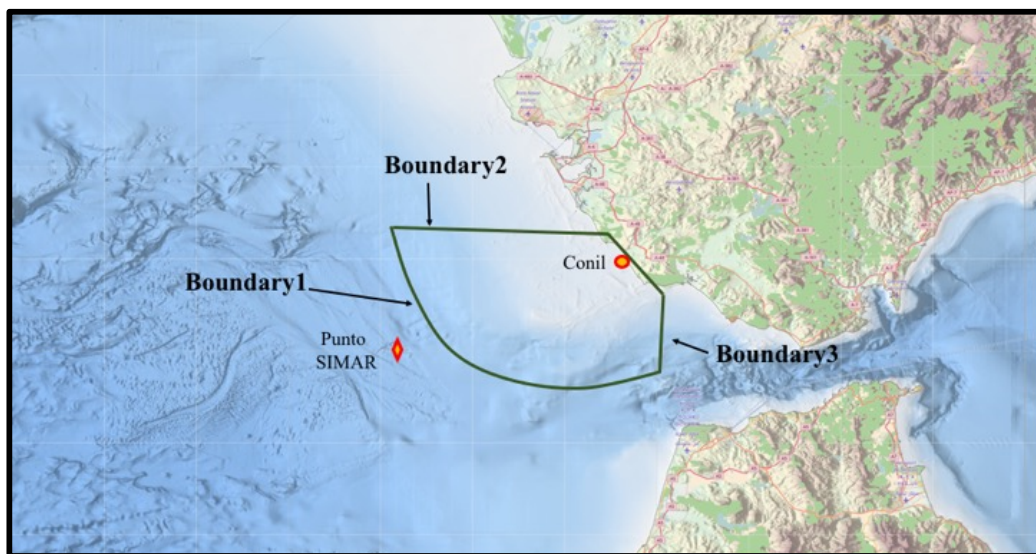
**Tabla 6-2** Características del grid para cada malla

### 6.3.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno, como se indicó anteriormente, serán **prescritos únicamente en la Malla 1**, ya que en el resto de mallas éstas serán tomadas según el espectro interpolado (véase de nuevo la Figura 6-3).

Se impondrá la entrada de oleaje según los datos del punto SIMAR en tres contornos:

- Boundary1. Contorno circular. Cara oeste.
- Boundary2. Cara norte.
- Boundary3. Cara sureste.



**Figura 6-7** Contornos de entrada de oleaje

## 6.4 Transformación oceanográfica

Conviene resaltar que el proceso de transformación de estados oceanográficos que se procede a explicar en este apartado es la clave del presente trabajo para la consecución de los objetivos marcados.

La metodología general para realizar la transformación de estados oceanográficos se basa en los siguientes puntos:

1. Selección de un subconjunto representativo de la serie offshore.
2. Propagación de los estados de mar de dicho subconjunto.
3. Reconstrucción del resto de estados de oleajes no propagados.

Dado que el objetivo final es obtener los parámetros de surf para toda la serie offshore y no los estados de oleaje propagados, se ha implementado el siguiente proceso alternativo:

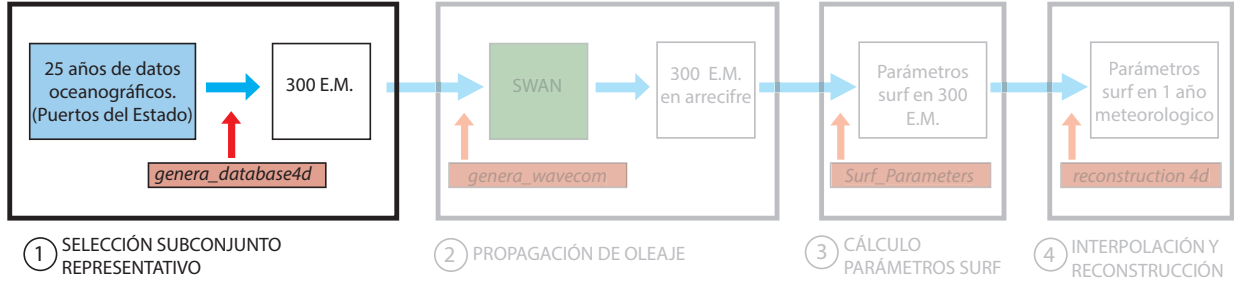
1. Selección de un subconjunto representativo de la serie offshore.
2. Propagación de los estados de mar del subconjunto.
3. Cálculo de parámetros de surf del subconjunto.
4. Reconstrucción de los parámetros de surf para el resto de estados de oleajes no propagados.

Cabe destacar la gran utilidad que supone este proceso, ya que hace posible **obtener los parámetros de surf para cualquier estado de mar sin necesidad de propagación**.

Se expone a continuación cada uno de los pasos del proceso.

### 6.4.1 Selección de subconjunto representativo

El primer paso del proceso de transformación oceánica consiste en la selección de una serie reducida de casos representativos del oleaje en profundidades indefinidas.



**Figura 6-8** Paso 1: Selección del subconjunto representativo

La selección de estos estados de mar a propagar se realiza mediante el algoritmo de máxima disimilitud (MDA, Maximum Dissimilarity Algorithm) que permite la identificación del subconjunto  $M$  con mayor diversidad posible del total de la base  $N$  datos. (Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R., 2011). Es decir, si se dispone de una muestra de datos  $\chi = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  compuesta por  $N$  vectores, el objetivo del algoritmo consiste en obtener un número  $M \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$  de vectores de los datos de partida que representen la diversidad de los datos.

El algoritmo de máxima disimilitud está basado en la distancia euclídea-circular, equiparando los pesos relativos de las diferentes variables. Para ello, estas variables son normalizadas de manera que la distancia entre dos puntos de la serie queda definida en el intervalo  $[0,1]$ . La normalización se realiza en las variables escalares mediante su valor máximo/mínimo y en las circulares dividiendo por  $\pi$  (mayor distancia posible en el círculo es  $\pi$  rad). Así, los descriptores de los estados de mar de la serie offshore quedan normalizados:

$$H_n = \frac{H_s - H_{s,min}}{H_{s,max} - H_{s,min}} \quad (6-3)$$

$$T_n = \frac{T_s - T_{s,min}}{T_{s,max} - T_{s,min}} \quad (6-4)$$

$$\eta_n = \frac{\eta_{mm} - \eta_{mm,min}}{\eta_{mm,max} - \eta_{mm,min}} \quad (6-5)$$

$$\theta_n = \frac{\theta}{\pi} \quad (6-6)$$

donde el subíndice  $n$  indica que la variable está normalizada. Una vez normalizados los descriptores de los estados de mar, la distancia entre dos puntos  $x_i = (H_{n,i}, T_{n,i}, \theta_{n,i}, \eta_{n,i})$  y  $x_j = (H_{n,j}, T_{n,j}, \theta_{n,j}, \eta_{n,j})$  queda definida mediante la expresión 6-7:

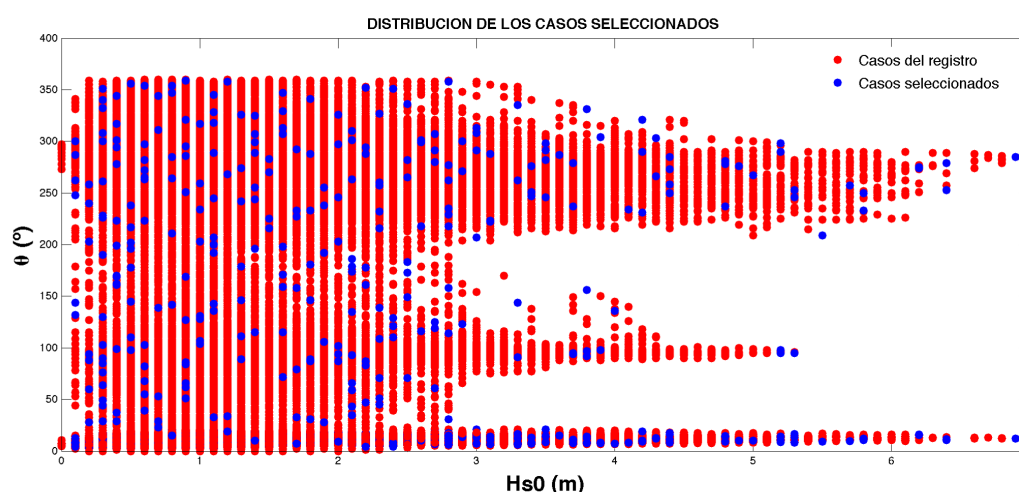
$$\|x_i - x_j\| = \sqrt{(H_{n,i} - H_{n,j})^2 + (T_{n,i} - T_{n,j})^2 + \min(|\theta_{n,i} - \theta_{n,j}|, 2 - |\theta_{n,i} - \theta_{n,j}|)^2 + (\eta_{n,i} - \eta_{n,j})^2} \quad (6-7)$$

El algoritmo comienza con la inicialización del primer vector  $d_1$ , que corresponde con el estado de  $H_{s,max}$ . La

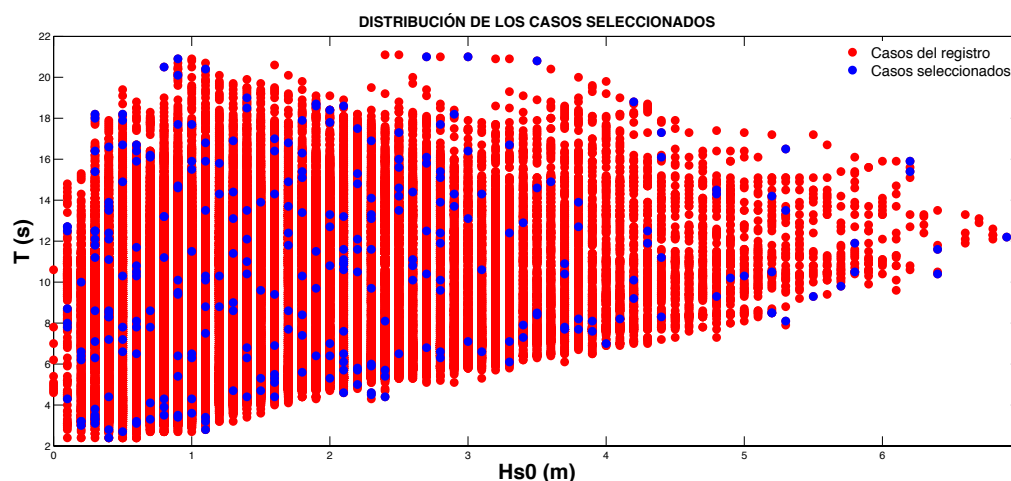
selección del resto de elementos se realiza iterativamente, y en cada iteración se transfiere al subconjunto aquel dato perteneciente a la base de datos de partida con mayor disimilitud respecto al subconjunto seleccionado.

En el caso en estudio, se ha partido de una base de datos de 25 años, coincidente con la vida útil establecida en el apartado 6.1. La base de datos posee información de la altura de ola, periodo, dirección y nivel del mar para cada hora durante los 25 últimos años (de 1991 a 2016), lo que supone un total de unos **219.000 estados de mar**<sup>8</sup>.

Dada la elevada dimensión de los datos seleccionados, en las figuras siguientes se muestran los diagramas de dispersión de los casos seleccionados (en azul) sobre los datos de partida (en rojo) para los parámetros descriptores del estado de mar.



**Figura 6-9** Distribución de casos seleccionados. Dirección-Altura de ola



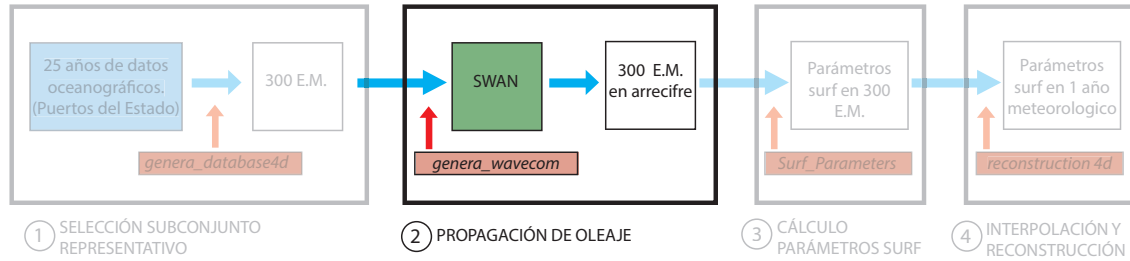
**Figura 6-10** Distribución de casos seleccionados. Periodo-Altura de ola

El motivo de la elección de 300 casos y no otra cantidad, radica en un **equilibrio** entre **fiabilidad** de los resultados y **coste computacional** de la propagación. Es decir, son suficientes casos para representar con rigor la diversidad del oleaje y a su vez asumibles computacionalmente.

<sup>8</sup> La base de datos oceanográficos se ha obtenido a través de Puertos del Estado correspondiente al SIMAR 6024030.

## 6.4.2 Propagación de oleaje

El subconjunto de 300 estados de mar obtenidos en el apartado anterior han de ser propagados mediante un **modelo numérico externo**, para poder continuar con estos resultados (estados propagados a aguas someras) con el algoritmo MDA.

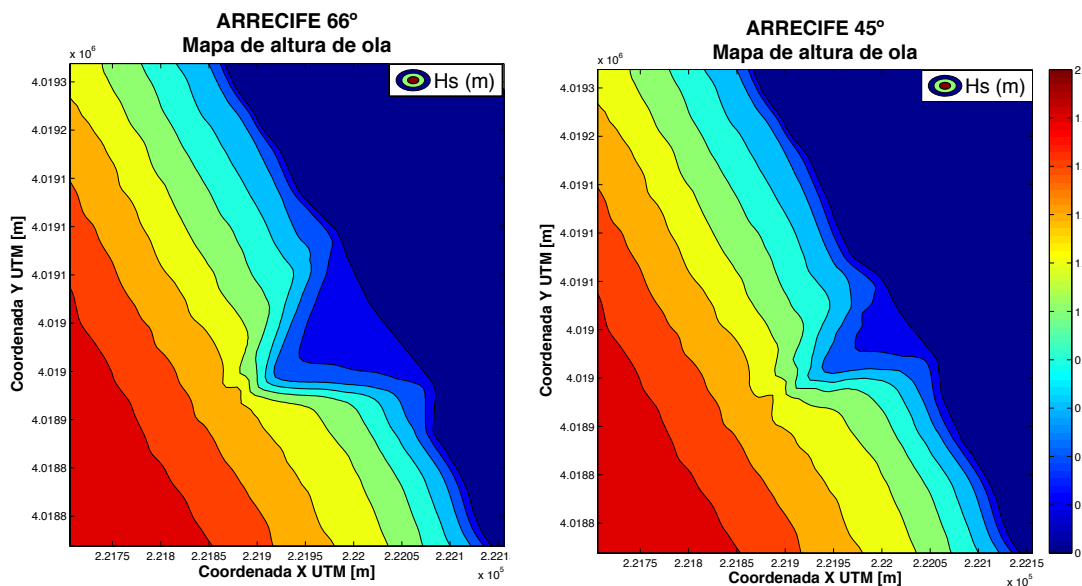


**Figura 6-11 Paso 2: Propagación del oleaje**

Como se indicó en el apartado 6.3, el modelo numérico de propagación de oleaje empleado ha sido SWAN, cuyas características, fundamentos teóricos y limitaciones han sido igualmente expuestos en dicho apartado.

Se trata, por tanto, de propagar los estados de mar del subconjunto seleccionado hasta el emplazamiento del arrecife. Para ello, se ha implementado una función de MATLAB® *genera\_wavecon.m* que genera un archivo de texto denominado *wavecon*. Este archivo contiene los datos de oleaje a propagar y permite a SWAN realizar una propagación de forma **automática** de todos los estados de mar.

Tras la propagación se obtienen los parámetros espectrales en los nodos de la malla de computación correspondiente. En este caso, son de interés únicamente los de la malla pequeña, pues es la que contiene el arrecife. Los parámetros necesarios para el cálculo de los parámetros de surf son los indicados en la Tabla 6-3.



**Figura 6-12 Mapa de altura de ola obtenido en los arrecifes de 66° y 45°**

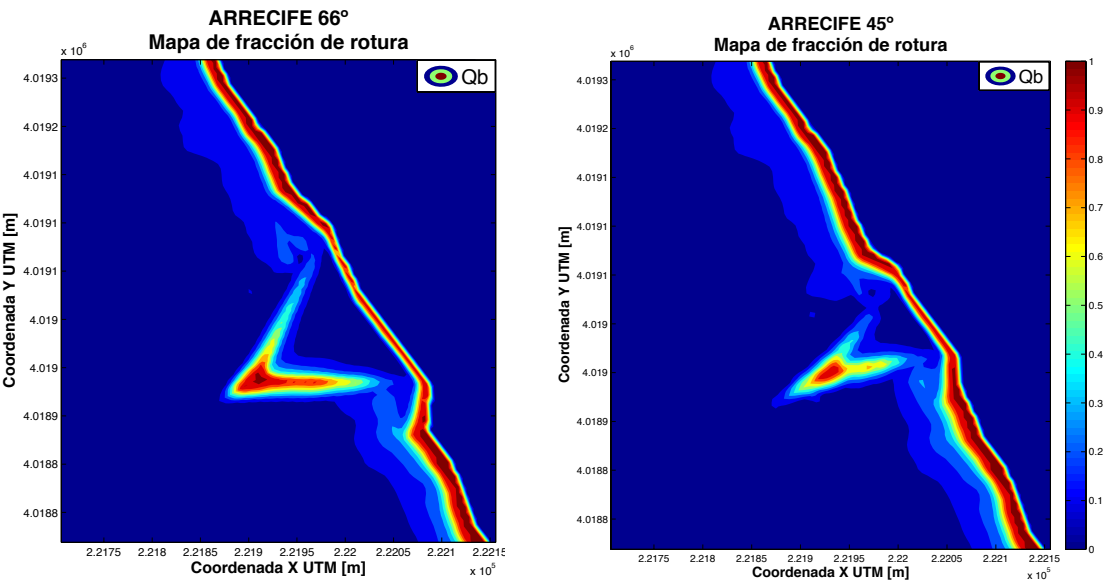


Figura 6-13 Mapa de fracción de rotura obtenido en los arrecife de 66° y 45°

Parámetro	Archivo generado
Altura de ola significativa	<i>hsig wave height.mat</i>
Dirección de oleaje	<i>hsig wave vector (mean direction).mat</i>
Longitud de onda	<i>mean wave length.mat</i>
Periodo de oleaje	<i>mean wave period T_{m01}.mat</i>
Profundidad	<i>water</i>
Grid	<i>wave grid.mat</i>
Fracción de rotura	<i>fraction breaking.mat</i>

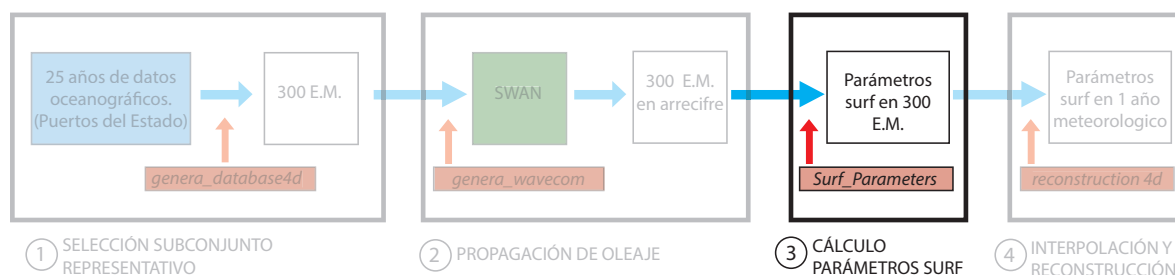
Tabla 6-3 Parámetros obtenidos tras la propagación de oleaje

Estos archivos generados por SWAN son matrices tridimensionales de 300x244x244. Es decir, una matriz de 244x244 (número de nodos de la malla pequeña) para cada uno de los 300 estados de mar. Estas matrices serán de gran utilidad para el desarrollo del trabajo.

Aunque, como se ha dicho, estos parámetros vienen dados en los nodos de las mallas, posteriormente pueden ser interpolados para cualquier punto del dominio.

6.4.3 Cálculo parámetros de surf

Los parámetros de surf (4.1) se han calculado mediante funciones programadas en MATLAB®, a partir de los datos devueltos por SWAN en el paso anterior del proceso.



**Figura 6-14** Paso 3: Cálculo de los parámetros de surf en los 300 E.M.

La viabilidad del arrecife se evaluará en función de los resultados de estos parámetros, por lo que este apartado es decisivo para el desarrollo del trabajo.

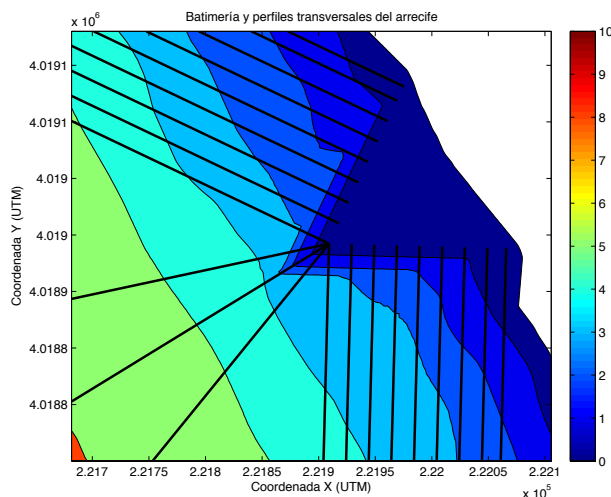
Dada la gran dimensión de datos, se han de manipular cuatelosamente definiendo un proceso claro de trabajo.

En primer lugar, se definirán perfiles transversales en el arrecife, en base a unos criterios a establecer. A continuación, se calcula el punto de rotura del oleaje para cada uno de estos perfiles, es decir, en que punto de cada perfil rompe el oleaje. Por último, se calculan los parámetros de surf en estos puntos de rotura.

#### 6.4.3.1 Definición de perfiles

Los **criterios** adoptados para la definición de los perfiles han sido los siguientes:

- Dirección transversal a los taludes del arrecife, siguiendo la línea de máxima pendiente.
- **Separación** entre ellos de **20 metros**, suficiente para captar la evolución de la ola a lo largo de las aspas del arrecife, desde la cresta hasta la línea de costa.



**Figura 6-15** Perfiles transversales cada 20 metros

- Longitud del perfil tal que garantice, en la gran mayoría de los casos, localizar la rotura de la ola. En condiciones de BMVE será cuando el oleaje rompa más alejado de la línea de costa. Bajo estas condiciones, si imponemos que la ola es de hasta 4 metros de altura:

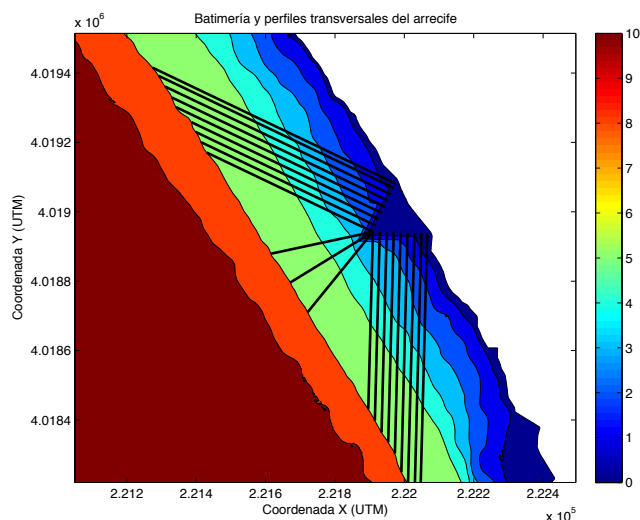
$$\frac{H_b}{h_b} \approx 0,5 \rightarrow h_b = \frac{4}{0,5} = 8 \text{ m}$$

siendo,

- $H_b$  la altura de ola en rotura
- $h_b$  profundidad en rotura

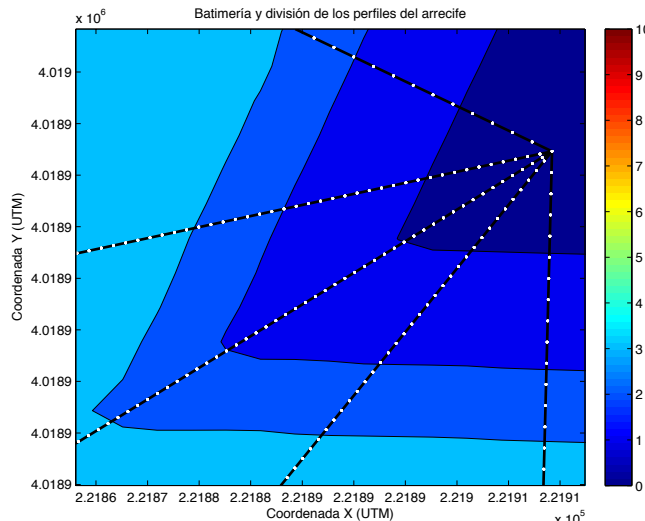
- 0,5 el criterio de rotura para alturas de olas significantes

Es decir, los perfiles llegarán hasta la línea batimétrica de **8 metros de profundidad** en condiciones de BMVE, y localizará roturas de olas de hasta 4 metros de altura en el peor de los casos.



**Figura 6-16** Perfiles transvesales hasta la batimétrica de 8 m

- Cada perfil se dividirá en **250 puntos** de evaluación, para conocer de forma continua los parámetros de oleaje a lo largo de cada perfil, y hallar así la rotura con la mayor exactitud posible. La longitud de los perfiles varían entre 780 (cerca de la costa) y 300 metros (en la cresta), por lo que cada punto de evaluación del perfil distará entre 3 y 1 metro respectivamente.



**Figura 6-17** Detalle de la división de perfiles en puntos de evaluación en la cresta

#### 6.4.3.2 Cálculo rotura de oleaje

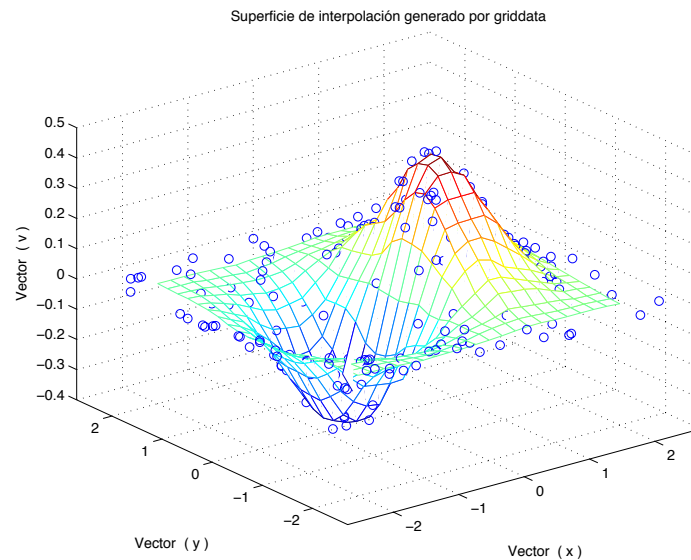
Una vez definidos los perfiles y los puntos de evaluación, se ha de localizar en qué punto, de los 250, se produce la rotura en cada perfil.

En primer lugar se ha de conocer cuáles serían los parámetros de oleaje (altura de ola y dirección) así como la profundidad en cada punto. Se conoce únicamente estos datos en los nodos del grid (244x244) calculados con SWAN.

Para pasar de estos puntos del grid a los puntos de los perfiles se ha implementado una función de interpolación de MATLAB® denominada **griddata**. Consiste en ajustar una superficie de la forma  $v = f(x, y)$  a los puntos



de unos vectores  $(x, y, v)$ , como se observa en la figura Figura 6-18.



**Figura 6-18** Ejemplo de interpolación con la función *griddata*

La función *griddata* interpola la superficie en los puntos solicitados (en nuestro caso, los puntos de los perfiles), y devuelve los valores interpolados (altura de ola, profundidad, dirección, etc.). Se impone que la superficie ha de pasar por los puntos definidos, en nuestro caso, por el grid (vectores  $x$  e  $y$ ).

Para una mejor comprensión, se concretiza la interpolación con un ejemplo para la altura de ola.

---

**Ejemplo 6-1.** Obtención de la altura de ola en los puntos de los perfiles conocidas éstas alturas en los nodos del grid

---

Para facilitar el ejemplo se considera un único estado de mar. En primer lugar necesitamos conocer las coordenadas  $x$  e  $y$  del grid, así como sus valores de altura de ola en estos puntos. Estos datos han sido obtenidos mediante SWAN y pueden ser cargados en MATLAB® como matrices (6.4.2). Omitiendo cálculos intermedios para ajustar dimensiones, la función de interpolación sería:

```
Hp=griddata(grd.data.X,grd.data.Y,Hs_2d,xperfiles,yperfiles);
```

siendo,

- `grd.data.X` Las coordenadas  $X$  del grid (244x244)
- `grd.data.Y` Las coordenadas  $Y$  del grid (244x244)
- `Hs_2d` Altura de ola en los puntos del grid (244x244)
- `xperfiles` Las coordenadas  $X$  de los 250 puntos de los 21 perfiles (21x250)
- `yperfiles` Las coordenadas  $Y$  de los 250 puntos de los 21 perfiles (21x250)

y devuelve  $H_p$ , valores interpolados de la altura de ola en todos los puntos de todos los perfiles (21x250).

---

Una vez conocidos la profundidad y altura de ola en todos los puntos de evaluación, basta con aplicar el criterio de rotura de McCowan (McCowan, 1891), quien estudiando olas solitarias determinó que el oleaje rompe cuando su altura alcanza un valor igual a una fracción de rotura:

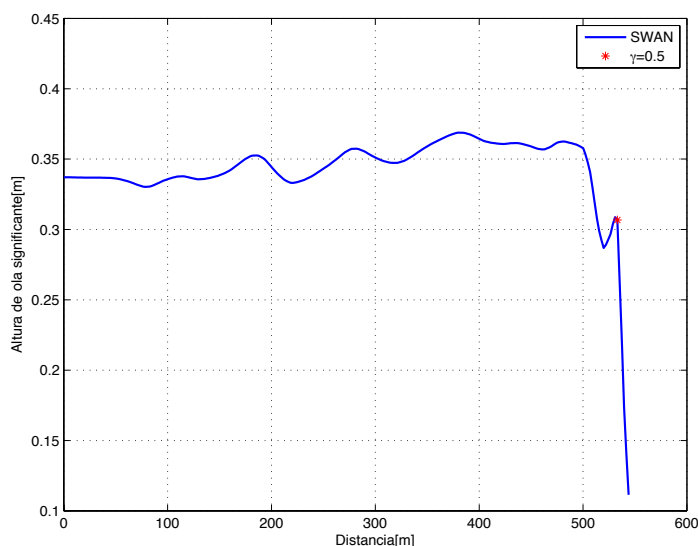
$$\frac{H_b}{h_b} = \gamma$$

siendo,

- $H_b$  altura de ola en rotura
- $h_b$  profundidad en rotura
- $\gamma$  parámetro de fracción de rotura

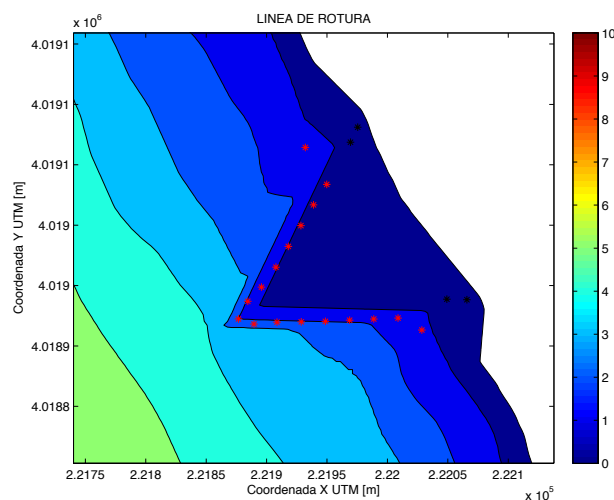
con  $\gamma$  igual a 0,78. Recordando de 4.2.1, los surfistas suelen tomar la ola más alta de cada serie. Por ello, para la altura de ola significativa e incluso para  $H_{1/10}$ , un valor de  $\gamma$  igual a 0.5 es más adecuado.

La Figura 6-19 muestra la variación de la altura de ola desde el comienzo de un perfil (distancia 0) hacia el arrecife. El **punto rojo** refleja el primer punto del perfil que satisface el criterio anterior, y por tanto se considera que la **ola ha roto**.



**Figura 6-19** Variación de la altura de ola en un perfil

Por último, se puede obtener la **línea de rotura** para cada estado de mar, sin más que uniando los puntos de rotura de cada perfil.



**Figura 6-20** Ejemplo de línea de rotura

En la figura Figura 6-20 se muestra un ejemplo del cálculo de la línea de rotura. En **rojo**, son los puntos de **rotura** localizados en cada perfil. En **negro**, cuando **no existe rotura** en el perfil. En este caso, en los perfiles cercanos a la costa no hay rotura, ya que la ola viene muy propagada y con poca altura, por lo que no cumple el criterio de rotura adoptado.

La línea de rotura desempeña un papel muy influyente en algunos de los parámetros de surf que determinarán la funcionalidad del arrecife, como se verá en capítulos posteriores.

### 6.4.3.3 Cálculo de los parámetros de surf

Como se vió en el capítulo 4.1, existen varios parámetros que indican la aptitud de una ola para ser surfada:

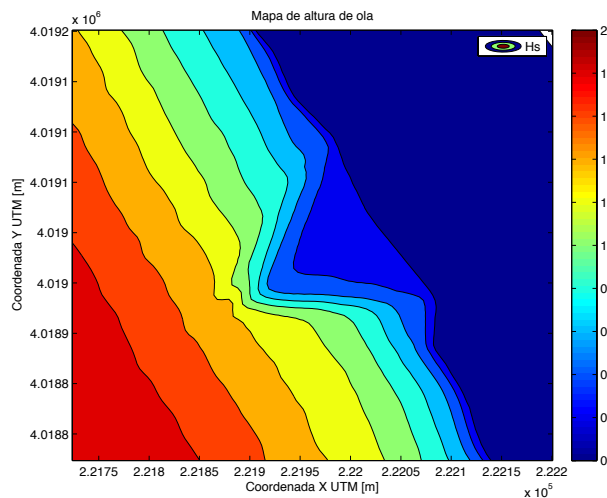
- Altura de ola en rotura
- Peel Angle
- Intensidad de rotura.
- Longitud de sección

La longitud de sección, sin embargo, no será objeto de cálculo en el presente apartado, pues solo indica la distancia de la ola en la que se mantiene constante los otros tres parámetros (4.2.4).

#### Altura de ola en rotura $H_b$

La obtención de este parámetro ya ha sido explicada anteriormente para localizar la rotura del oleaje (6.4.3.2).

La Figura 6-21 representa un mapa de altura de olas en la zona del arrecife para un estado de mar concreto.

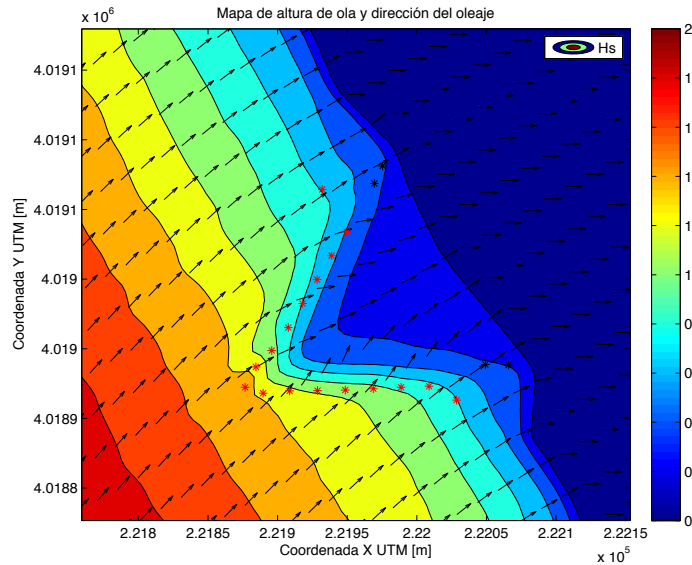


**Figura 6-21** Ejemplo mapa de altura de olas para el estado de mar Dir=290°; Hs=3.1m; T=12s

#### Peel Angle $\alpha$

El cálculo del *peel angle* es el que conlleva mayor complejidad de todos. Para su cálculo, se ha programado una función `Calculate_Peel_Angle.m`. Se recuerda que el *peel angle* es el ángulo existente entre la línea de rotura y el frente de onda.

A modo de ejemplo, la Figura 6-22 muestra la línea de rotura que seguiría el oleaje (puntos rojos) frente a la dirección de la ola (flechas negras). El ángulo entre ambas es el *peel angle*.



**Figura 6-22** Mapa de direcciones y altura de ola

#### **Intensidad de rotura $B_I; I_b$**

De nuevo, estos parámetros se han calculado mediante una función denominada `Calculate_BreakIntensity.m`, que devuelve:

- Intensidad de rotura  $B_I$
- Número de Iribarren  $I_b$

Ambos parámetros son representativos de la intensidad de rotura del oleaje, aunque el número de Iribarren se emplea especialmente para conocer el tipo de rotura de la ola.

#### **6.4.4 Interpolación y reconstrucción**

Aunque una explicación exhaustiva de la técnica de interpolación queda fuera del alcance de este trabajo, se pretende exponer a *grosso modo* su funcionamiento.

La técnica de interpolación empleada está basada en funciones denominadas de base radial (Radial Basis Functions, *RBF*), idóneas para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente.

Se parte del subconjunto  $d_j$  resultado de la aplicación del MDA a la serie offshore normalizada y de los valores de transformación dinámica correspondientes ( $d_{p,j}$ ). Para el resto de puntos no propagados  $x_i$  se definen unos interpolantes *RBF* con la siguiente función objetivo:

$$RBF(x) = p(x) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|x_i - d_j\|)$$

donde,

- $p(x)$  es un polinomio lineal
- $a_j$  son los coeficientes de ajuste RBF
- $\Phi$  es la función radial básica

Se definirá una función de interpolación para cada parámetro del estado de mar ( $RBF_H, RBF_T, RBF\theta, RBF\eta$ ) a partir de los casos representativos seleccionados y de sus valores en el emplazamiento del arrecife. Estos interpolantes se emplean para trasladar el resto de puntos  $x_i$  de la serie original.

En este punto del proceso se habrían obtenido ya los estados de mar en el emplazamiento del arrecife para todo el registro de la serie, mediante la reconstrucción del subconjunto elegido. Faltaría, por tanto, el cálculo de los

parámetros de surf para toda la serie. Sin embargo, debido a la multitud de datos, este cálculo conllevaría un coste computacional prácticamente inviable. Se propone, por tanto, aprovechar el gran potencial de la técnica de interpolación de base radial y realizar la reconstrucción directamente de los parámetros de surf. Es decir, de forma análoga se crea una función de interpolación para cada parámetro de surf, basándose en los valores obtenidos de estos parámetros para cada caso del subconjunto seleccionado. De esta forma, solo es necesario el cálculo de los parámetros para el subconjunto de 300 casos.

## 6.5 Simulaciones

Para comprobar la viabilidad del arrecife, se han simulado **dos arrecifes** variando su ángulo de abertura: de **45°** y **66°**.

Además, se contemplará un **escenario sin arrecife** que sirva de comparativa entre la situación actual y la proyectada, en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones. Los perfiles, en este caso, se dispondrán perpendicular a la línea de costa. Dado que el gradiente del fondo en el sentido longitudinal (línea de costa) en este caso es mínimo, sólo se ha considerado el estudio en dos perfiles, lo suficiente para obtener todos los parámetros.

Se ha tomado como base de datos oceanográficos los últimos **25 últimos años** de registro: del 24 de noviembre de 1991 al 24 de noviembre de 2016.

La reconstrucción se ha realizado para el último **año meteorológico** completo: del 1 de septiembre de 2015 al 31 de agosto de 2016. Aunque esta reconstrucción se podría tomar para toda la vida útil del arrecife, se ha optado por un único año meteorológico a modo de prueba de la metodología empleada.

## 7 RESULTADOS

*Es preferible obtener una respuesta razonablemente aproximada pero rápida, que invertir más tiempo y obtener el mismo resultado con más decimales.*

*-Robert L. Norton-*

**P**ara cada uno de los escenarios simulados se han obtenido una serie de resultados, cuya interpretación determinará la viabilidad del diseño del arrecife en cada escenario y permitirá obtener conclusiones sobre los objetivos marcados del trabajo.

Los resultados considerados más relevantes para su análisis se pueden englobar en cuatro grupos:

1. **Operatividad.** Es necesario conocer con que frecuencia el arrecife será operativo, es decir, cumple unas condiciones mínimas para la práctica del surf. El arrecife será operativo si cumple las siguientes condiciones (ambas necesarias):
  - La ola ha roto.
  - La altura de ola es mayor de 0,3 metros.
2. **Puntuación de la ola.** Se ha creado una puntuación de la ola operativa o surfeable, que definirá la complejidad de ola y, por tanto, el tipo de surfista apropiado. Según lo visto en capítulos anteriores, la puntuación se obtendrá según los siguientes criterios en cada parámetro de surf:
  - Intensidad de rotura. Puede ser media, alta, muy alta o extrema, aumentando la dificultad cuanto mayor sea.
  - Altura de ola. En general, a menor altura de ola, mayor dificultad para surfearla.
  - *Peel angle*. Altos ángulos de descrestamiento favorecen el surf para los principiantes.

De esta forma, se podrá conocer para que tipo de surfistas será más apropiado el arrecife, y en que zona del mismo. Se han establecido cuatro niveles:

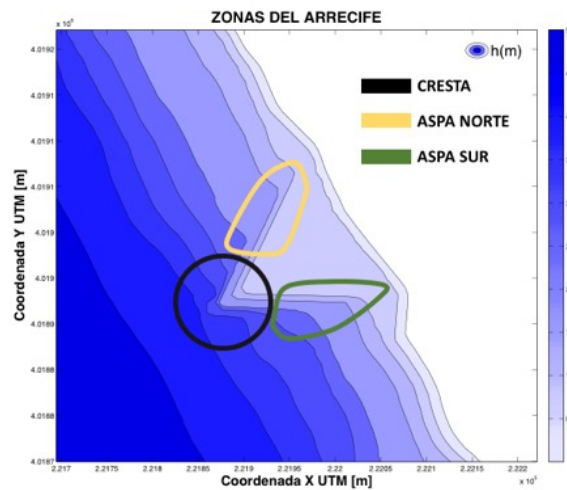
- Nivel 1: Principiante
- Nivel 2: Medio-Bajo
- Nivel 3: Medio-Alto

- Nivel 4: Avanzado

3. **Evolución temporal** de los parámetros de surf. Se obtendrá la evolución de cada parámetro de surf a lo largo del año meteorológico.
4. **Relación entre variables.** ( $H_0$ ,  $T$ ,  $\theta_0$ ,  $\eta$ ) y la **surfeabilidad**. Se pretende determinar posibles relaciones entre los descriptores de los estados de mar en aguas indefinidas ( $H_{so}$ ,  $T$ ,  $\theta_0$  y  $\eta$ ) y los parámetros de surf, o entre estos y la operatividad del arrecife.

Todos estos resultados se obtendrán en tres zonas diferenciadas del arrecife: en la **cresta**, el **aspa norte** y el **aspa sur**, que corresponden con los siguientes perfiles:

- Aspa norte: perfiles 1:7
- Cresta: perfiles 8:14
- Aspa sur: perfiles 15:21



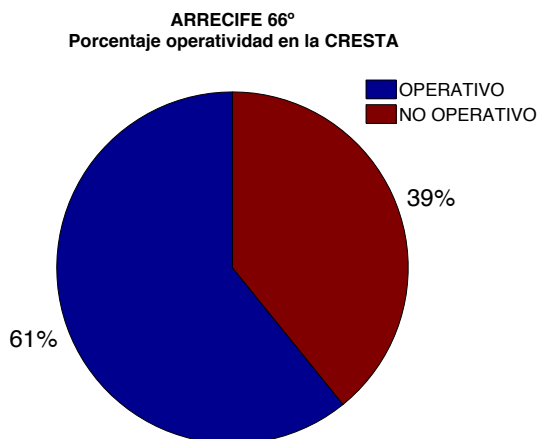
**Figura 7-1** Zonas del arrecife

## 7.1 Arrecife 66 grados

### 1. Operatividad

- **CRESTA**

La cresta es el primer obstáculo que encuentra el oleaje procedente del oeste. El oleaje se refracta menos y la altura de ola es mayor, propiciando mayores casos de rotura de ola. Por esta razón, es la zona que presenta mayor frecuencia de operatividad, alcanzando un 61% para el año meteorológico analizado.

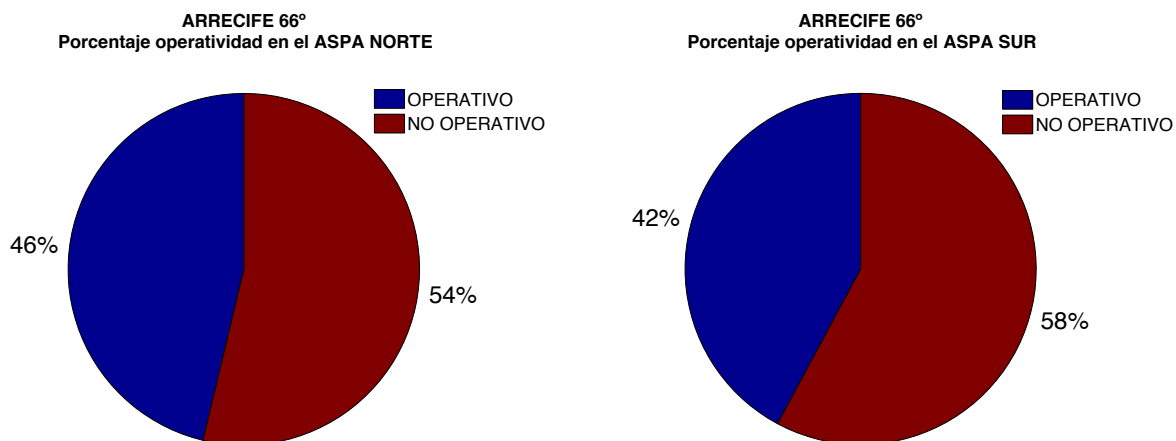


**Figura 7-2** Análisis de la operatividad en la cresta. Arrecife 66°

#### ■ ASPAS NORTE Y SUR

Para el caso de las aspas los resultados son parecidos: el oleaje tiende a refractarse disminuyendo la altura de ola, dificultando la operatividad de la ola. Por la orientación del arrecife, el aspa norte se encuentra más abierto a aguas profundas, por lo que el oleaje de procedencia N-NW *impacta* directamente con la cara del aspa dando lugar a altura de olas mayores.

No obstante, en ambas zonas se alcanzan niveles notablemente elevados de operatividad, rondando el 45%.



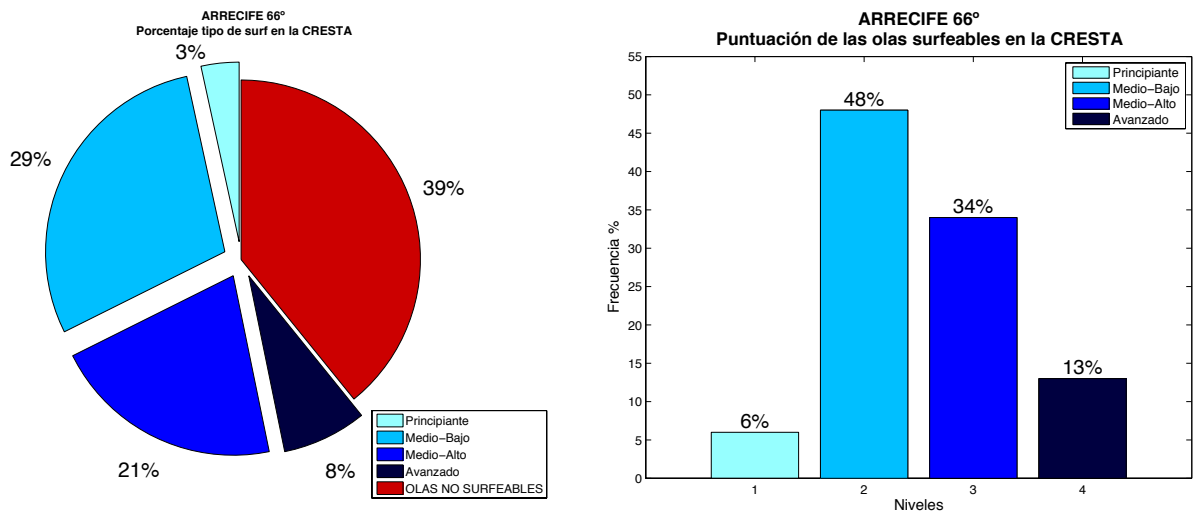
**Figura 7-3** Análisis de operatividad en las aspas. Arrecife 66°



## 2. Puntuación

### ■ CRESTA

Como se verá en el siguiente apartado, en la zona de la cresta se han obtenido *peel angle* de rango mayor que en el resto del arrecife. Altos valores de peel angle son adecuados para los surfistas principiantes e intermedios, por la menor velocidad de descrestamiento de la ola (4.2.2). Si además tenemos en cuenta que las alturas de ola son mayores, se obtienen condiciones idóneas para este tipo de surfistas.



**Figura 7-4** Análisis del tipo de surfista en la cresta. Arrecife 66°

Bajo estas condiciones, los surfistas principiante e intermedios podrían practicar surf hasta en un 88% de las ocasiones.

### ■ ASPA NORTE Y SUR

Por la misma razón que se comentó en la operatividad de las aspas, la ola rota de poca altura y ángulos de descrestamientos bajos generan condiciones solo aptas para surfistas avanzados con mucha mayor frecuencia que en la cresta: más de un tercio de las olas surfeables. Los resultados en ambas aspas son similares.

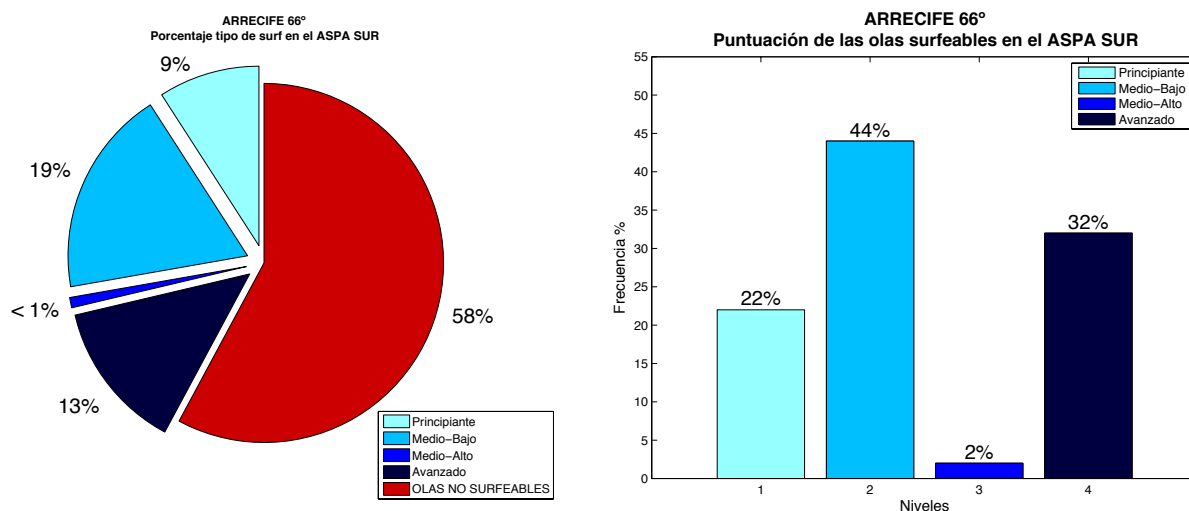


Figura 7-5 Análisis del tipo de surfista en el aspa sur. Arrecife 66°

### 3. Evolución temporal

#### ▪ Altura de ola en rotura

Durante los meses de invierno se producen las mayores alturas de ola en rotura, periodo en el que la operatividad es protagonista.

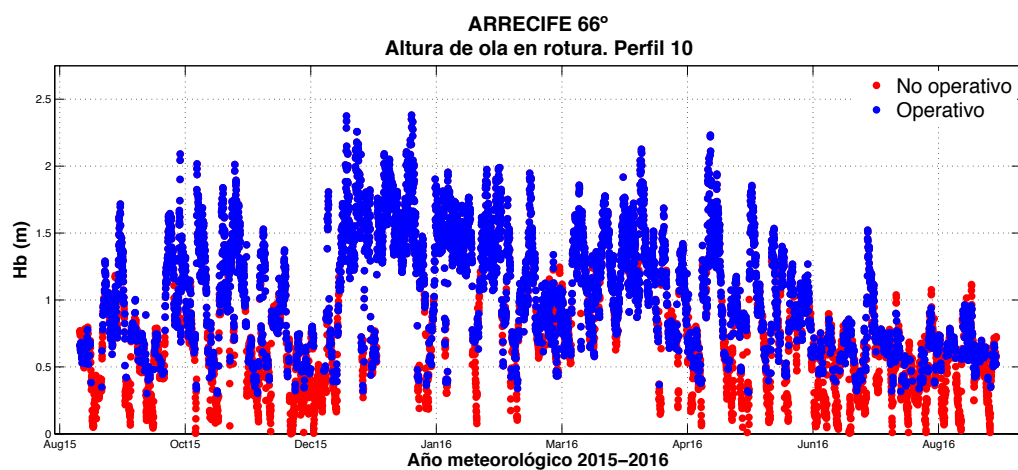
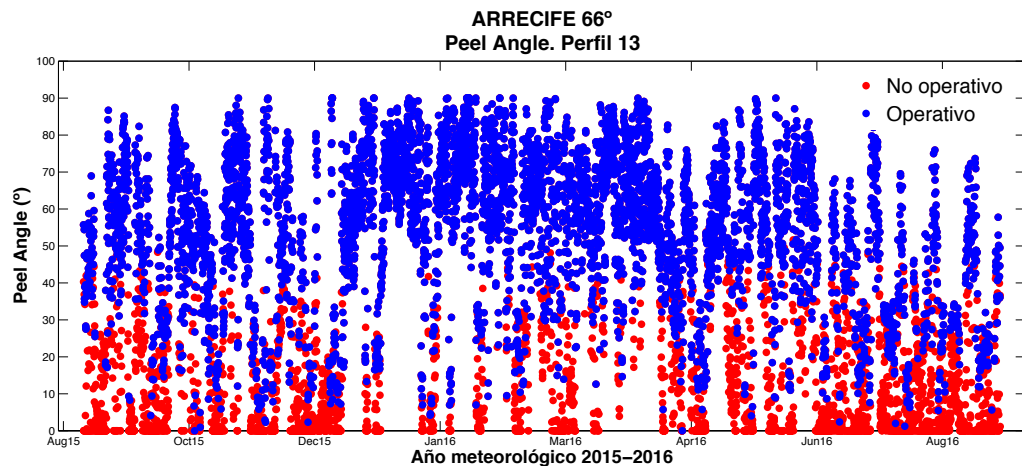


Figura 7-6 Evolución temporal de la altura de ola en rotura. Arrecife 66°

#### ▪ Peel Angle

El ángulo de descrestamiento sigue una variación constante en todo el año meteorológico, con menor frecuencia de valores bajos durante los meses de invierno.

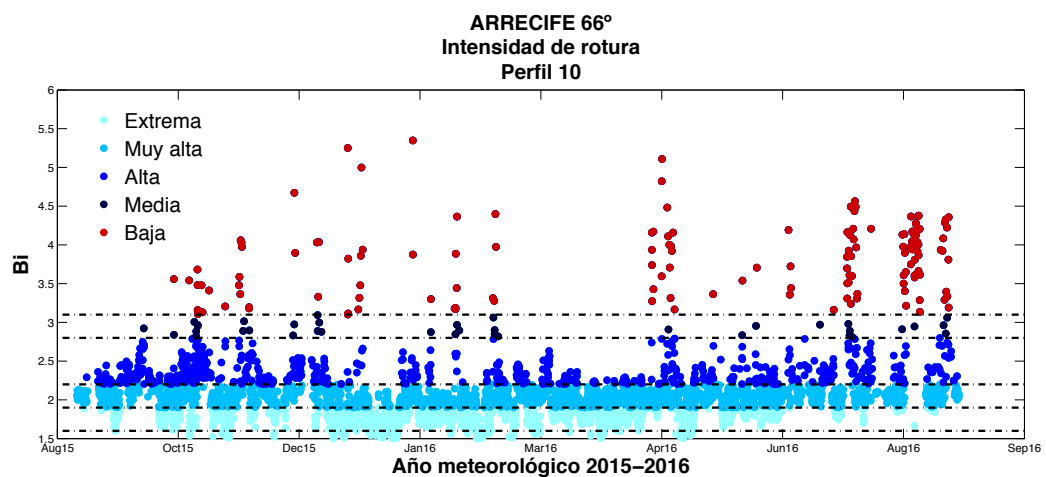
Para valores de *peel angle* pequeños, la ola en la mayoría de los casos no es operativa.



**Figura 7-7** Evolución temporal del peel angle. Arrecife 66°

#### ■ Intensidad de rotura

Se recuerda al lector que a mayor intensidad de rotura mayor destreza ha de tener el surfista para tomar la ola. La intensidad depende, como se vio en el capítulo 4.2.3, del gradiente del fondo en el instante de la rotura. El perfil diseñado en 5.2.4 provoca roturas con altas intensidades, como pueden observarse en los resultados obtenidos.



**Figura 7-8** Evolución temporal de la intensidad de rotura. Arrecife 66

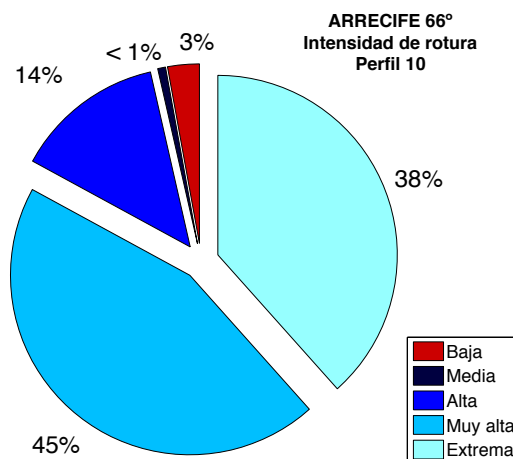


Figura 7-9 Portentaje de intensidad de rotura. Arrecife 66°.

#### ▪ Número de Iribarren

Aunque el número de Iribarren puede ser algo general, si proporciona una buena idea de la forma de rotura de la ola (4.2.3).

Se observa que en la inmensa mayoría de los casos se obtiene una rotura tipo *plunging*, la más deseada por los surfistas por la formación de una voluta en la cresta de la ola, seguida de la rotura *spilling*, también del gusto de los surfistas menos extremos.

Además, según se observa en la Figura 7-12, en el perfil 6 –aspa norte- la rotura tiende a ser más extrema que en la cresta, con incluso algún caso de rotura tipo *collapsing* y un 95% *plunging*.

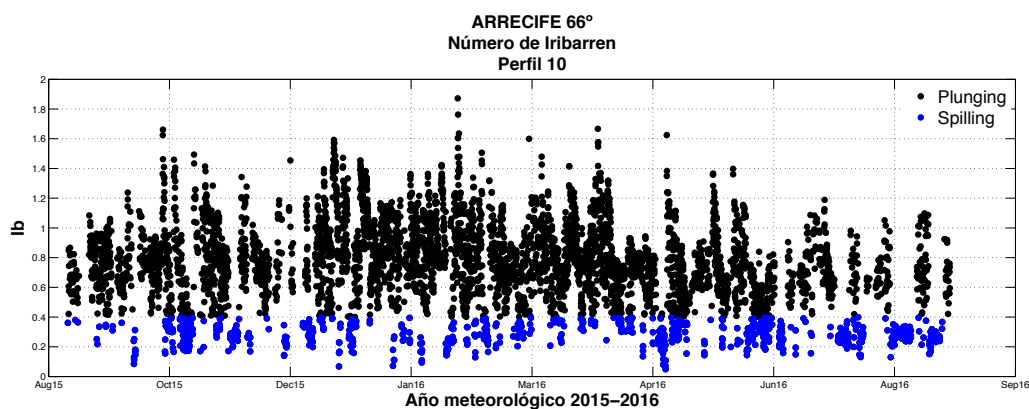
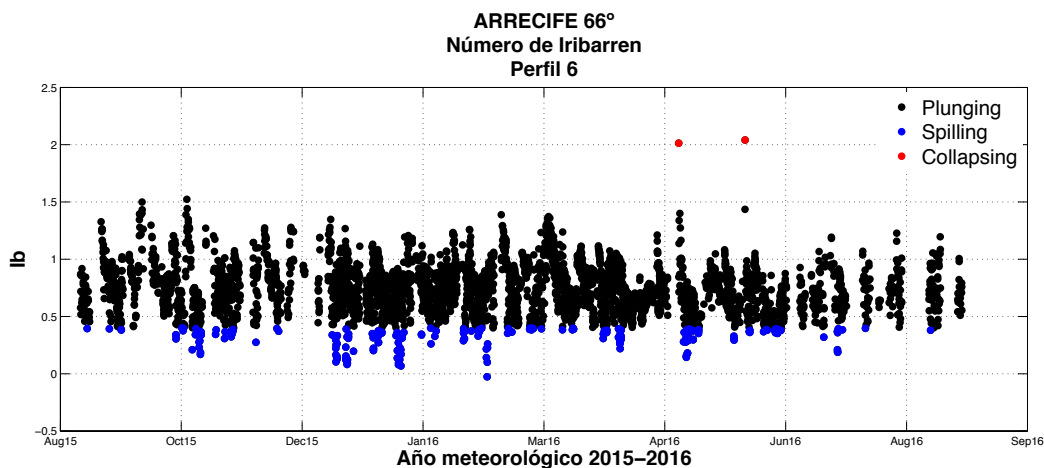
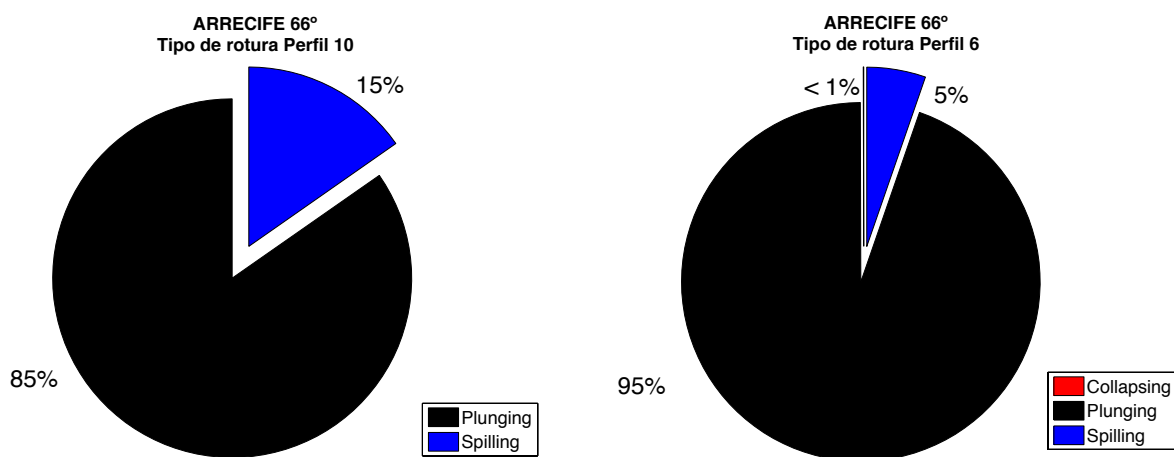


Figura 7-10 Evolución temporal del número de Iribarren. Perfil 10. Arrecife 66°



**Figura 7-11** Evolución temporal del número de Iribarren. Perfil 6. Arrecife 66°



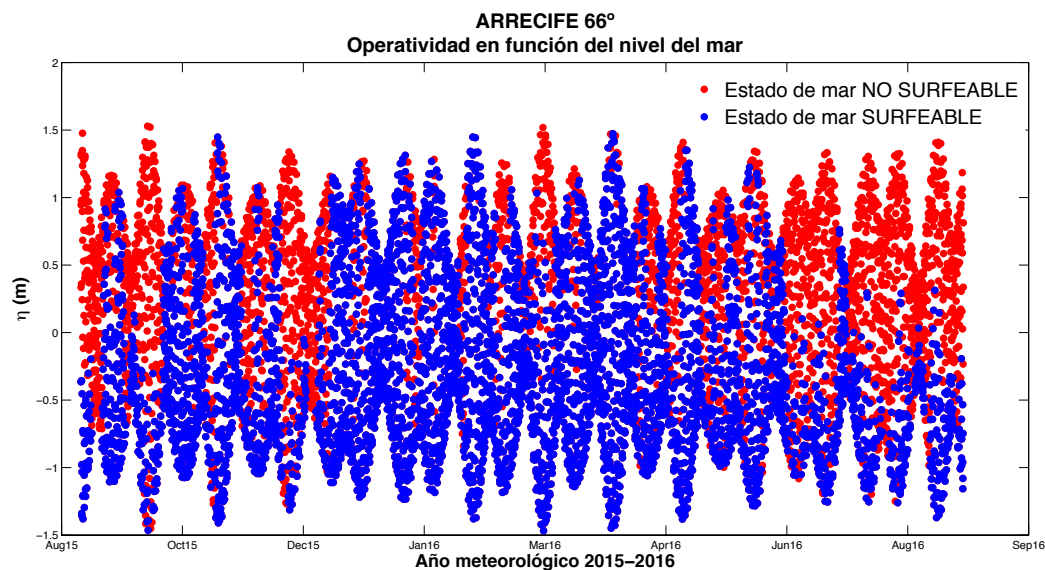
**Figura 7-12** Porcentaje del tipo de rotura. Arrecife 66°

#### 4. Relación entre parámetros

##### ▪ Nivel del mar

Las condiciones de marea determinan cual será la profundidad en el arrecife en cada estado de mar. Niveles altos de marea hacen necesario alturas de olas mayores para alcanzar la rotura. La Figura 7-13 pone de manifiesto esta relación: en niveles del mar elevados frecuentan condiciones no operativas en el arrecife.

Se observa también una mayor frecuencia de operatividad durante los meses de invierno, debido a las mayores alturas de ola en estos meses –zona central de la Figura 7-13-.

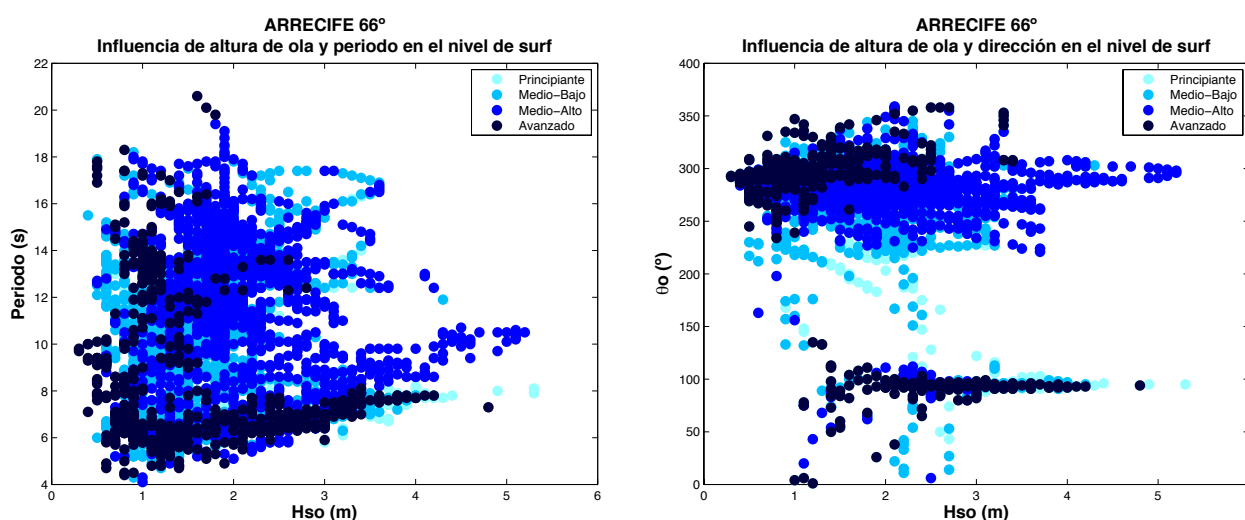


**Figura 7-13** Análisis de la operatividad en función de la marea

#### ▪ Nivel del surfista

Se ha realizado un análisis de la posible relación de los descriptores de cada estado de mar (altura de ola, periodo y dirección) en aguas indefinidas con el nivel de surf obtenido en la cresta del arrecife. En la Figura 7-14 izquierda se observa que para periodos bajos (4-8s) existe mayor frecuencia de surf de nivel avanzado.

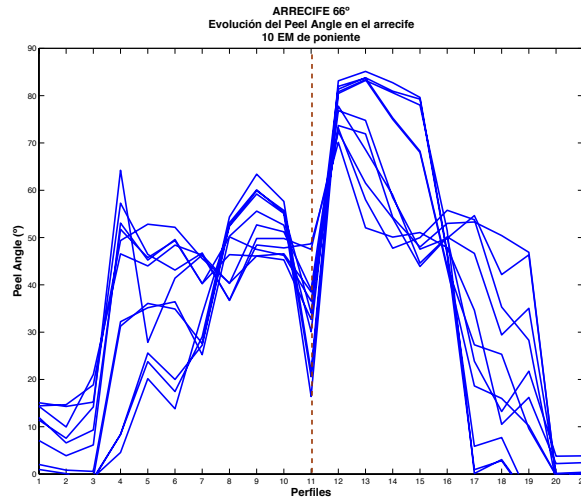
Por otro lado, los oleajes de procedencia W-NW y alturas de olas menores acumulan la mayoría de situaciones de surf avanzado.



**Figura 7-14** Análisis de la influencia de  $H_{s0}$ ,  $T$  y  $\theta_o$  en el nivel del surf obtenido

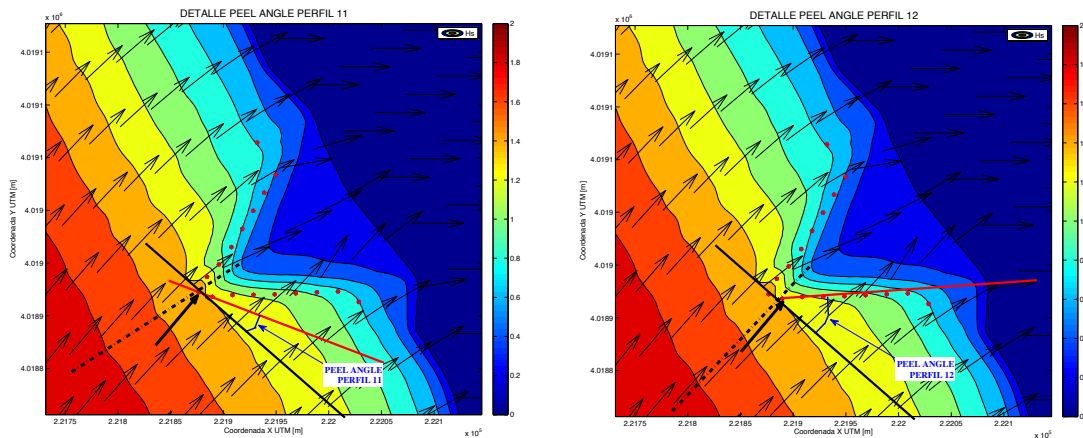
## - Peel Angle

Como se adelantó anteriormente, el *peel angle* varía a lo largo del arrecife. En las aspas norte y sur, perfiles 1:7 y 15:21 respectivamente, el frente de onda tiende a alinearse con el arrecife debido al fenómeno de refracción, generando menores ángulos de descrestamiento cuanto más alejado se esté de la cresta.



**Figura 7-15** Variación del *Peel Angle* en el arrecife

Esta evolución presenta una excepción en el perfil 11, coincidente con la punta del arrecife. En este lugar del arrecife se produce un quiebro en la línea de rotura. Este cambio provoca que el *peel angle* disminuya siempre en este perfil, y vuelve a aumentar al pasar la punta del arrecife (Figura 7-16).



**Figura 7-16** Detalle del cambio del *Peel Angle* en la punta del arrecife

Por otro lado, si analizamos los valores del **peel angle** obtenidos en función de la dirección del oleaje en aguas profundas, estos son mayores en oleajes de poniente -coincidente con la orientación de la punta del arrecife-. Además, en la figura Figura 7-17 se puede apreciar cierta similitud en la

dispersión de los valores del *peel angle* para los perfiles de la cresta: sus valores máximos se pueden acotar bajo una misma curva –línea roja–.

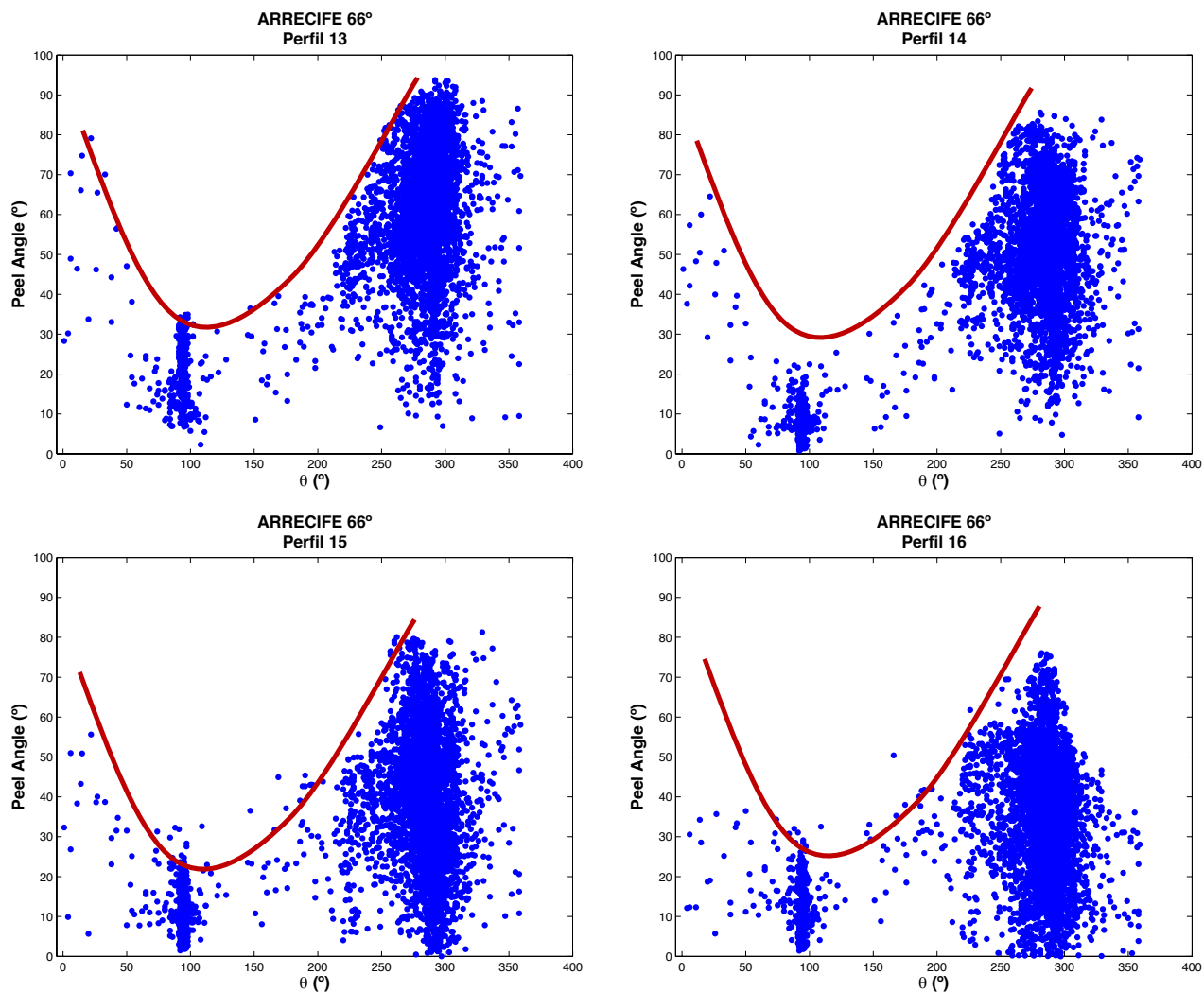
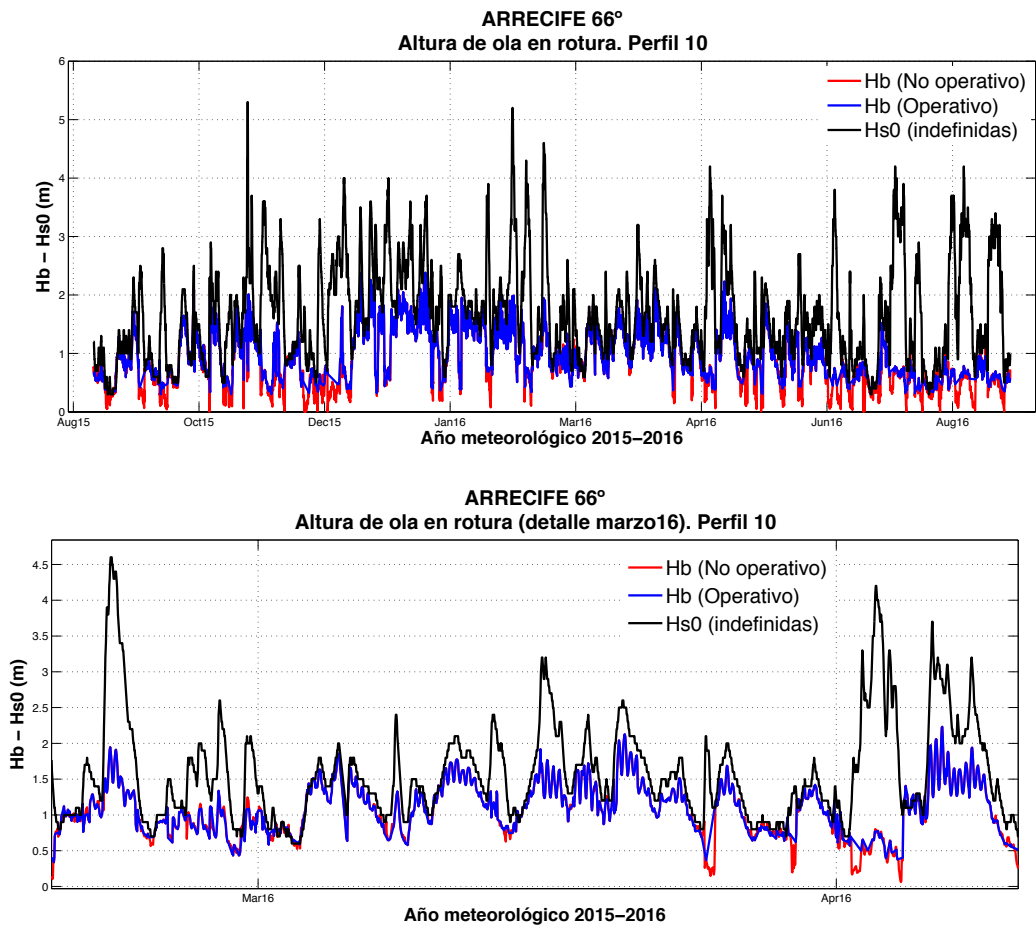


Figura 7-17 Análisis de la relación *Peel Angle* -  $\theta_o$

#### ▪ Altura de ola

A continuación se muestran la comparativa a lo largo del tiempo de la altura de ola en aguas indefinidas – negro- y la altura en rotura.





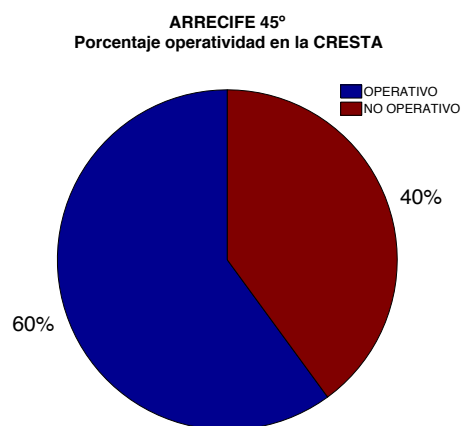
**Figura 7-18** Relación  $H_{s0} - H_b$

## 7.2 Arrecife 45 grados

### 1. Operatividad

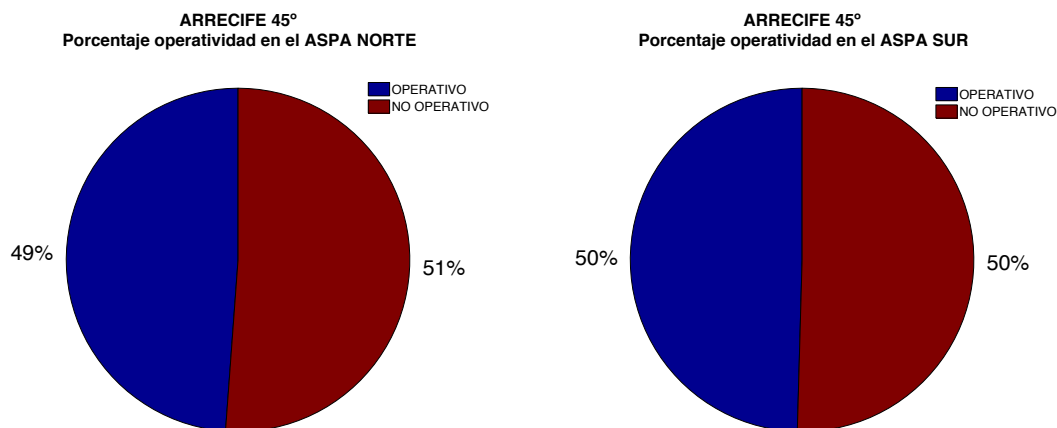
Los resultados obtenidos en cuanto a la operatividad del arrecife de 45° son prácticamente idénticos a los de 66°. En ambos casos, en la cresta es el lugar donde se puede practicar surf con mayor frecuencia, alcanzando valores de operatividad en torno al 60% de las ocasiones.

#### ■ CRESTA



**Figura 7-19** Análisis de la operatividad en la cresta. Arrecife 45°

## ■ ASPAS NORTE Y SUR



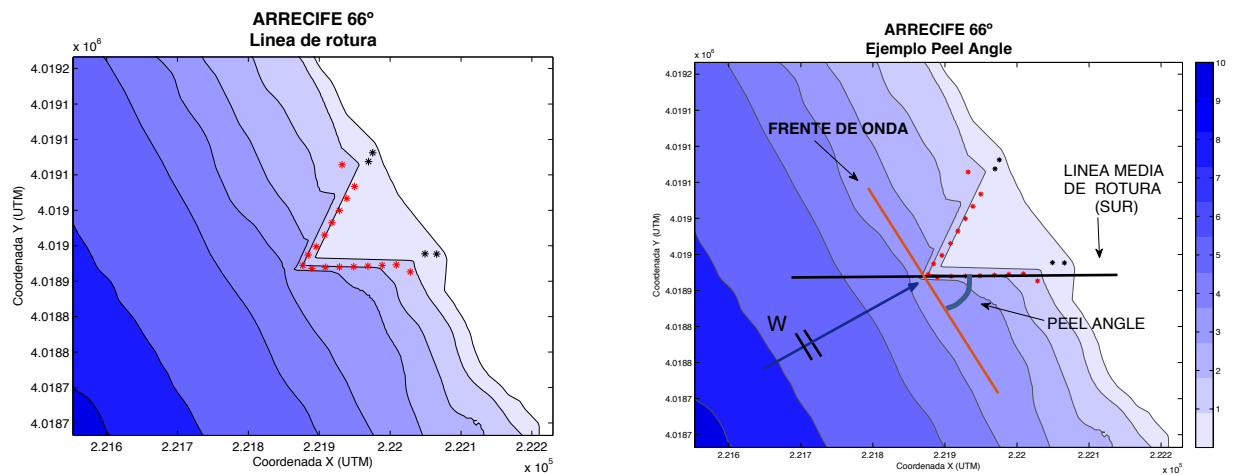
**Figura 7-20** Análisis de operatividad en las aspas. Arrecife 45°

## 2. Puntuación

Si bien la operatividad no varía entre ambos arrecifes diseñados, la puntuación o grado de dificultad de las olas presenta significativos cambios. El hecho de disminuir el ángulo de abertura hasta los 45° tiene una consecuencia directa: una variación de la línea de rotura provocando un aumento del ángulo de descrestamiento.

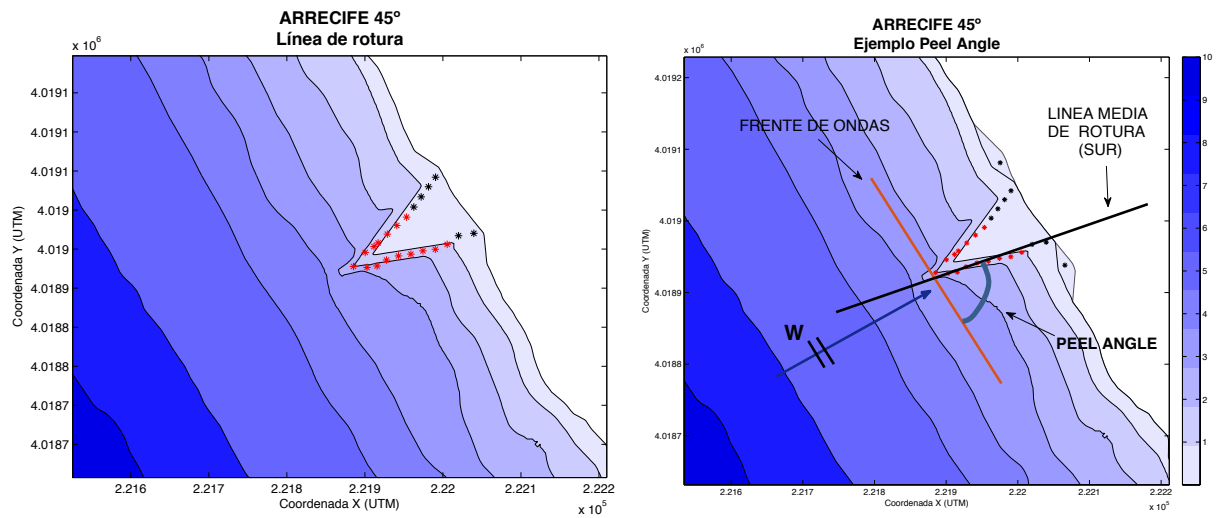
Las siguientes figuras aclaran esta variación, donde los puntos rojos indican el punto de rotura en cada perfil, y los negros, los casos de no rotura. Es decir, la línea que seguirían los puntos rojos (rotura) conforman la línea de rotura.

En la Figura 7-22, correspondiente al arrecife de 45°, la línea de rotura tiende a situarse en dirección perpendicular a la línea de costa. Esto provoca que los frentes de onda procedentes de la dirección predominante (oeste) formen con esta línea de rotura ángulos de descrestamientos muy abiertos, cercanos a los 90°.



**Figura 7-21** Comparativa Peel Angle. Arrecife 66°

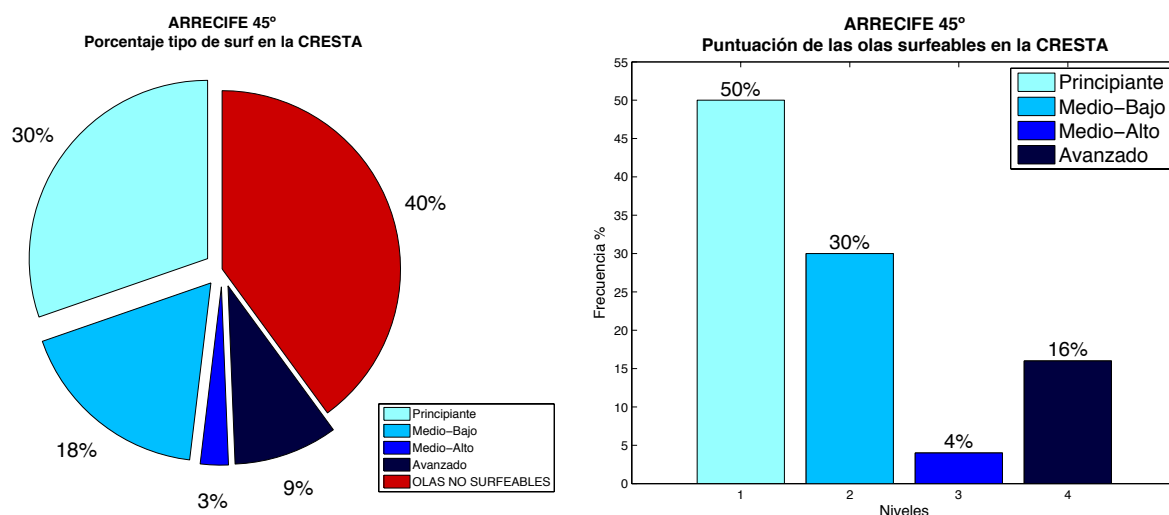
Por otro lado, en el arrecife de 66° (**Figura 7-21**) la línea de rotura se encuentra más alineada con la línea de costa, por lo que el ángulo de descrestamiento medio es menor frente a oleaje de procedencia predominante.



**Figura 7-22** Comparativa Peel Angle. Arrecife 45°

#### ▪ CRESTA

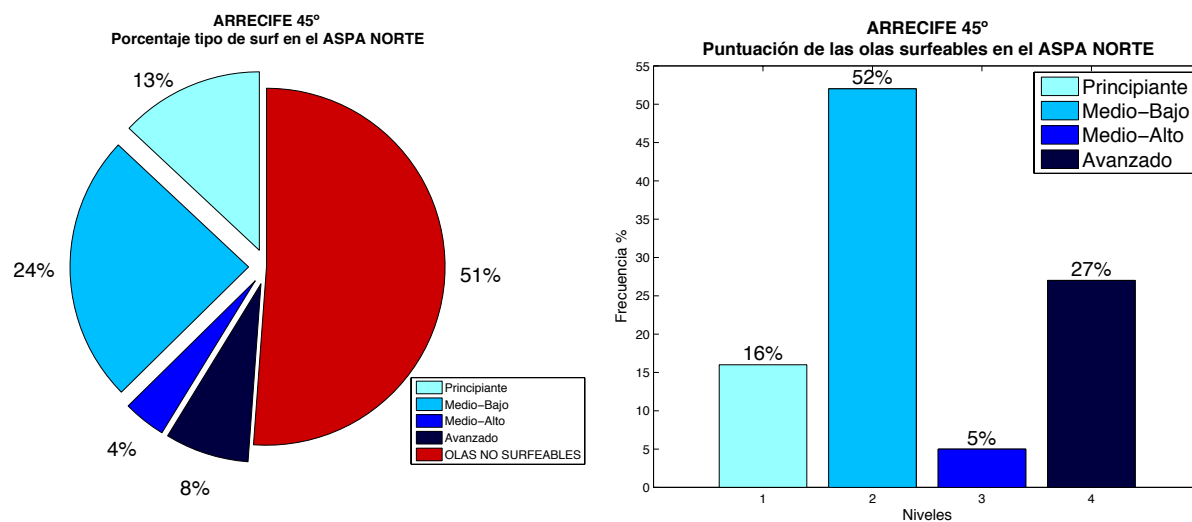
Como consecuencia de este aumento generalizado del ángulo de descrestamiento, el grado de dificultad de la ola disminuye notablemente. Por esta razón, el porcentaje de olas surfearles aptas para surfistas principiantes aumenta notablemente hasta el 50% de los casos, frente al 6% que se obtuvo con el arrecife de 66°.



**Figura 7-23** Análisis del tipo de surfista en la cresta. Arrecife 45°

#### ■ ASPA NORTE Y SUR

De nuevo el grado de dificultad de las olas disminuyen, especialmente en el aspa sur, originado por la propia orientación del arrecife: el aspa norte se encuentra encarada hacia aguas profundas.



**Figura 7-24** Análisis del tipo de surfista en el aspa norte. Arrecife 45°

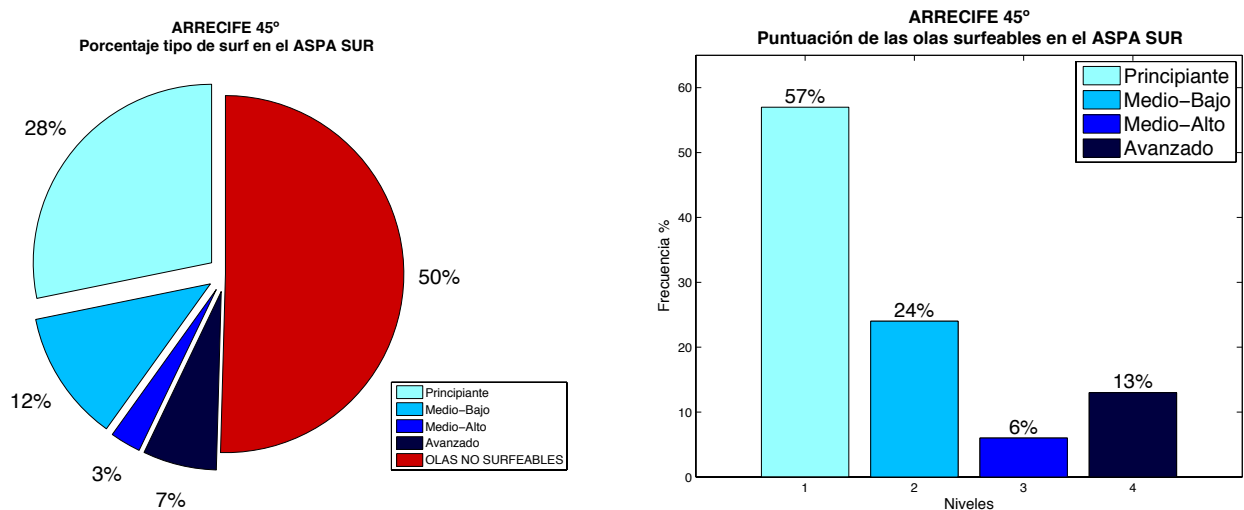


Figura 7-25 Análisis del tipo de surf en el aspa sur. Arrecife 45°

### 7.3 Comparación entre arrecifes de 66° y 45°

La operatividad entre arrecifes no varía significativamente, sólo es ligeramente superior en el arrecife de 66°.

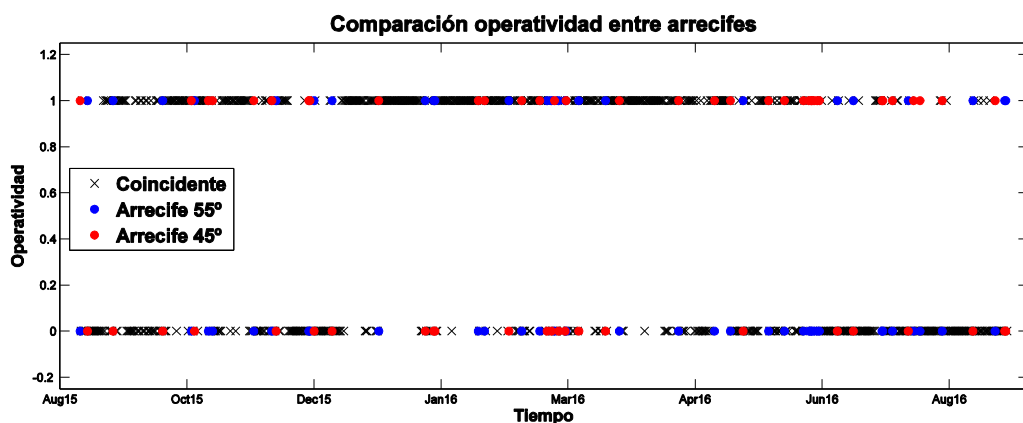


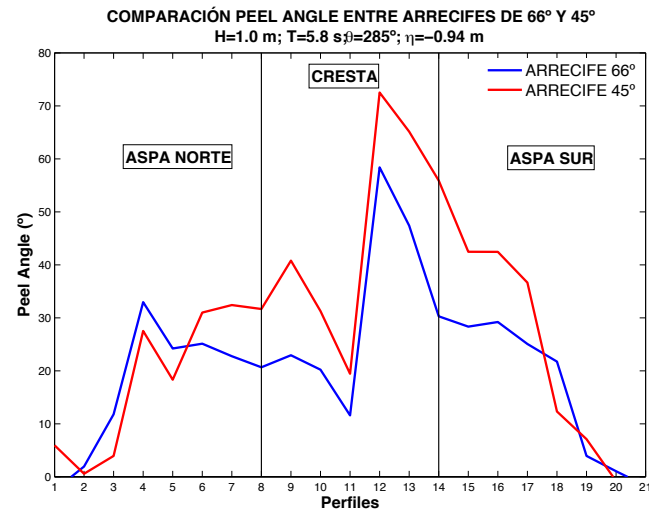
Figura 7-26 Comparación de la operatividad entre arrecifes

Como se adelantó en el apartado anterior, la principal diferencia observada entre ambos arrecifes es el ángulo de descrestamiento.

Tomaremos un estado de mar típico para observar la respuesta de ambos arrecifes:

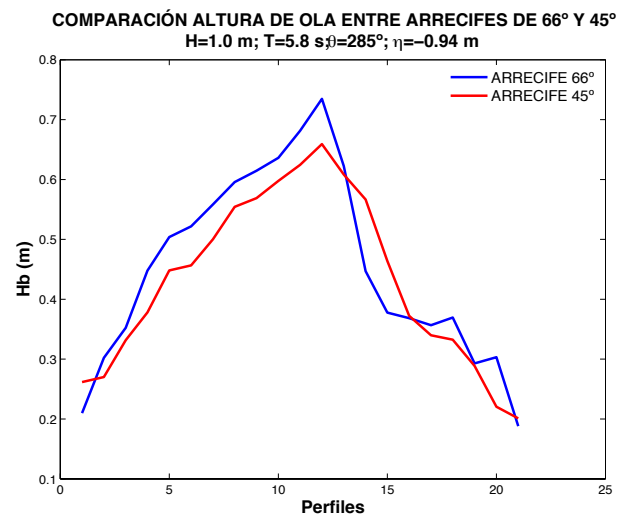
$$H_b = 1.0 \text{ m} ; T = 5.8 \text{ s} ; \theta_b = 285^\circ ; \eta = -0.94 \text{ m}$$

En la Figura 7-27 se pone de nuevo de manifiesto esta diferencia del *peel angle*: el arrecife de 45° genera ángulos mayores, especialmente en la cresta y el aspa sur.



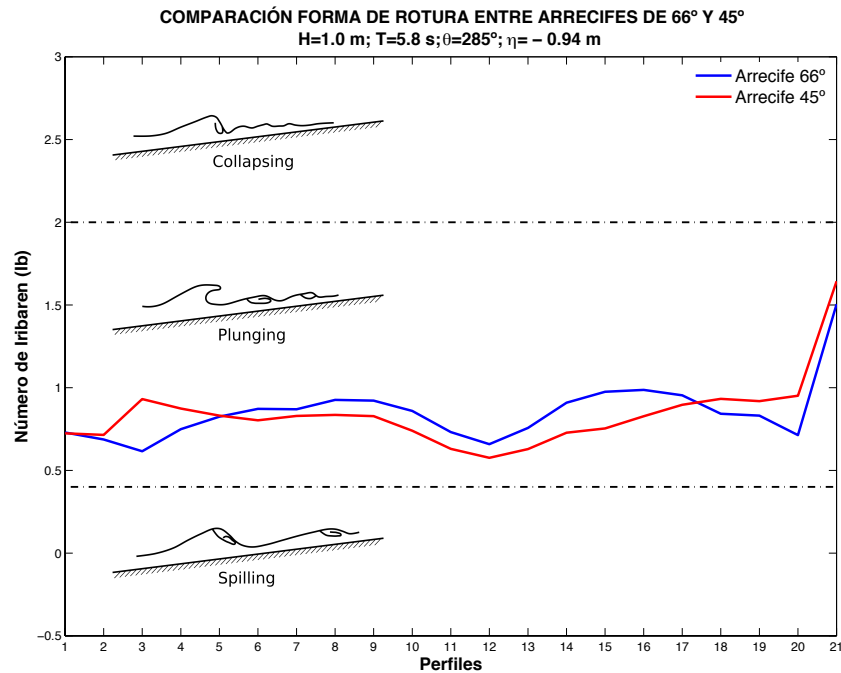
**Figura 7-27** Comparación del Peel Angle entre arrecifes

La altura de ola en rotura presenta valores similares en ambos arrecifes ante este estado de mar. El arrecife de 66° genera alturas de ola ligeramente superiores en el aspa norte y la cresta.



**Figura 7-28** Comparación de la altura de ola en rotura entre arrecifes

Por último, la forma de rotura también es muy parecida en los dos casos (Figura 7-29). Se obtienen en la mayoría de los casos números de Iribarren comprendidos entre 0.4 y 2, que corresponde con una rotura tipo *plunging*, la preferida de los surfistas.



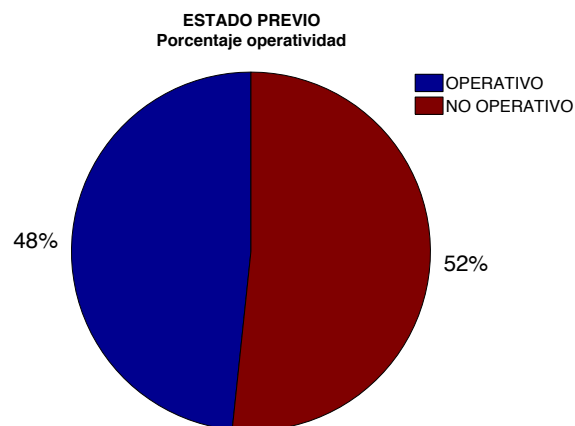
**Figura 7-29** Comparación de la forma de rotura entre arrecifes

## 7.4 Estado previo

Para poder obtener conclusiones de los resultados obtenidos, es necesario conocer cuáles eran las condiciones en el estado previo o situación actual. De esta forma se podrá saber hasta que punto se han modificado las condiciones de surf previas y si realmente han sido mejoradas lo suficiente para que su construcción sea viable.

### 1. Operatividad

La operatividad obtenida para el caso previo o sin arrecife roza el 50%. Es decir, aproximadamente la mitad de las ocasiones del año meteorológico analizado se podría practicar surf.



**Figura 7-30** Análisis de operatividad en el estado previo

## 2. Puntuación

El tipo de surfista más apropiado para estas condiciones tiene un perfil claro: más del 90% de las ocasiones solo sería apto para los más experimentados. Son olas con un alto grado de dificultad debido principalmente al ángulo de descrestamiento de la ola, como se analizará más adelante.

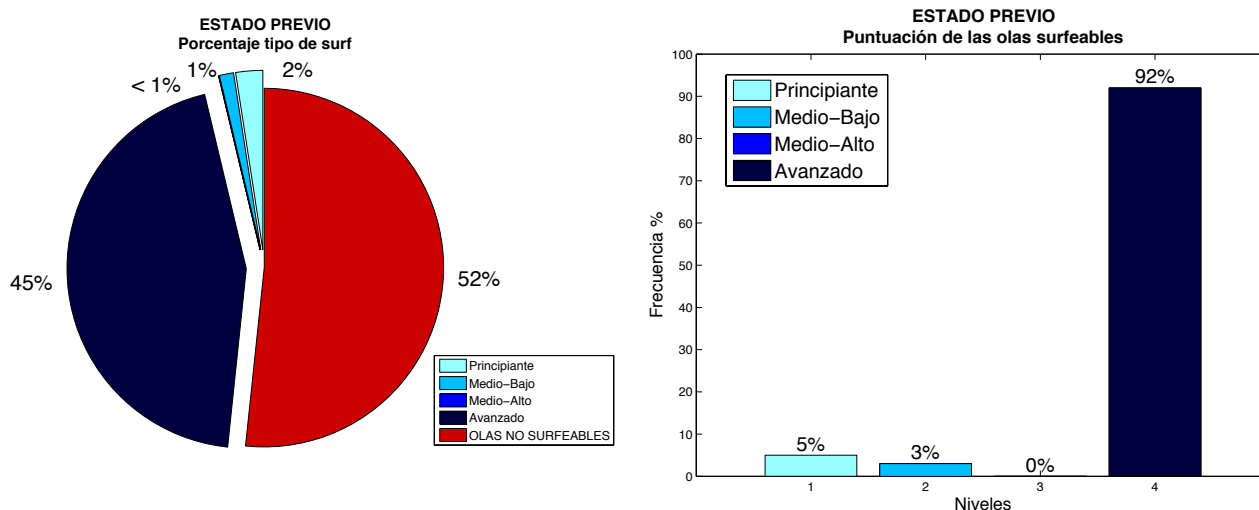


Figura 7-31 Análisis tipo de surf. Estado previo

## 3. Evolución temporal

### ▪ Número de Iribarren

La forma de rotura de la ola varía equitativamente entre *plunging* y *spilling*, siendo ligeramente más frecuente esta última. Aunque la rotura tipo *spilling* no es la más deseada para la mayoría surfistas, si es apta e incluso preferible para los surfistas que realizan maniobras más moderadas.

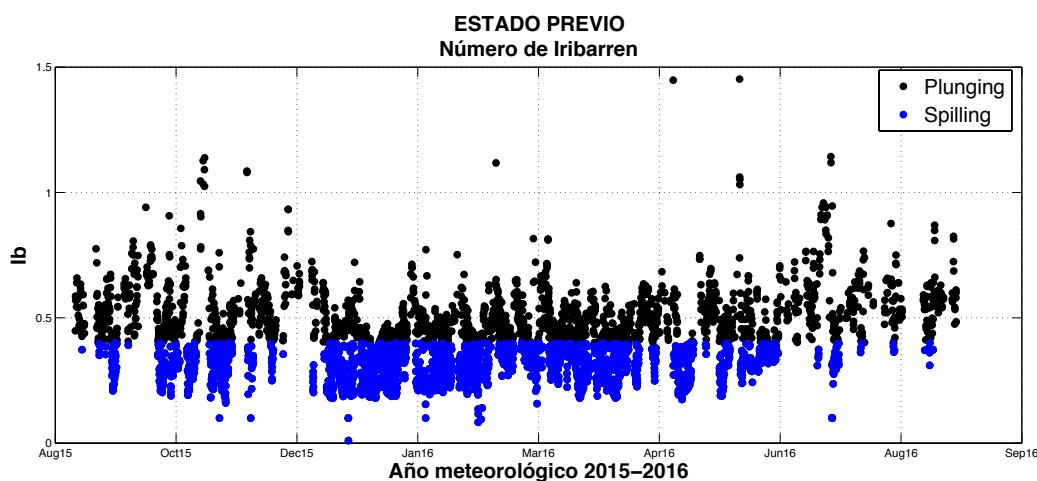
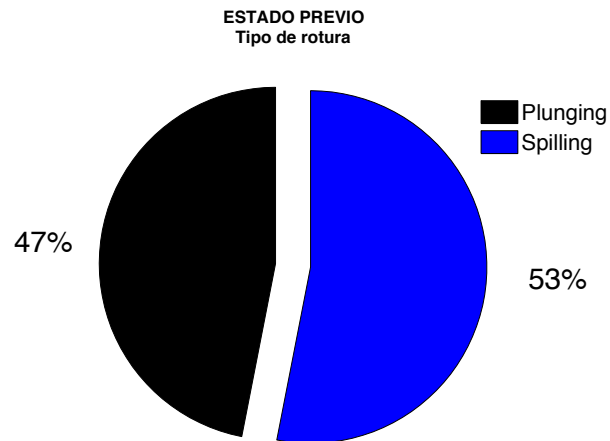


Figura 7-32 Evolución temporal del tipo de rotura. Estado previo

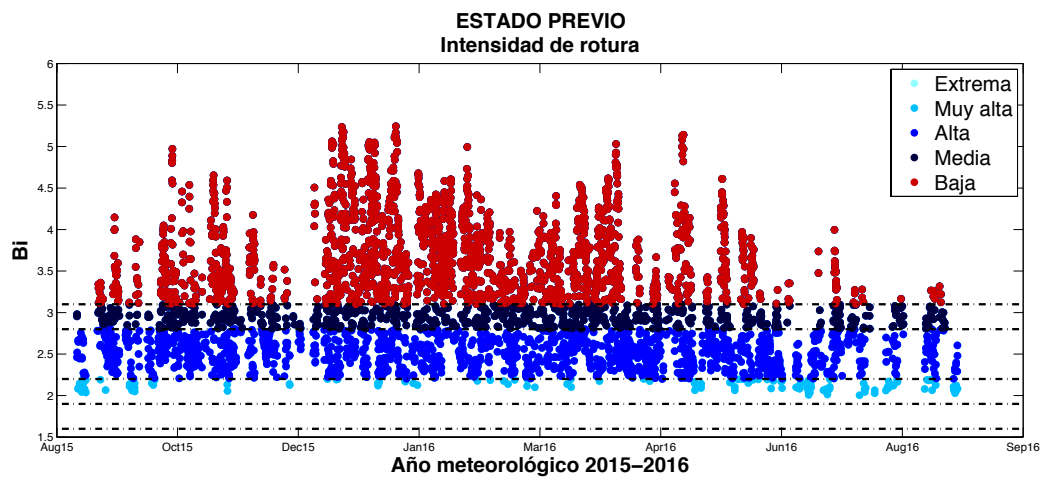




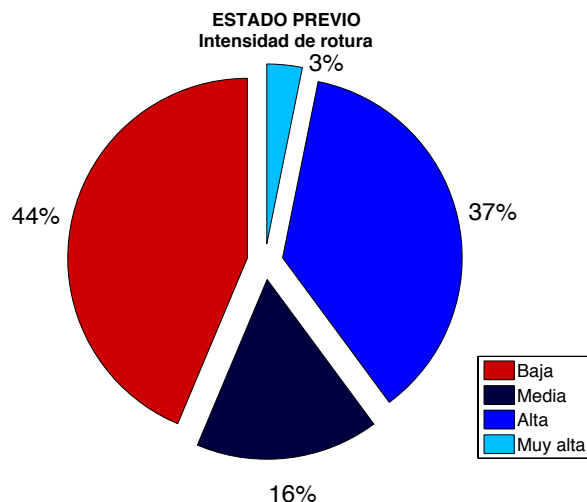
**Figura 7-33** Porcentaje de los tipos de rotura. Estado previo

▪ **Intensidad de rotura**

La situación sin arrecife provoca roturas de olas con intensidades, en general, medias o bajas. Intensidades altas o muy altas suman únicamente un 19% de ocasiones, y en ningún caso suceden olas con intensidad de rotura extrema.



**Figura 7-34** Evolución temporal de la intensidad de rotura. Estado previo



**Figura 7-35** Porcentaje de los tipos de rotura. Estado previo

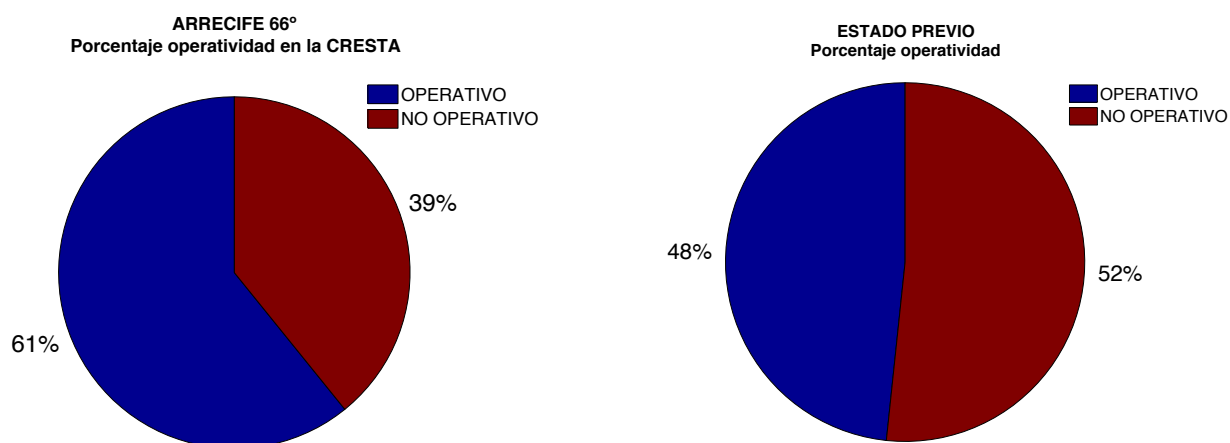
Aunque las intensidades medias pueden ser favorables para surfistas principiantes, la ola interesa que tenga un mínimo de intensidad para cualquier surfista. Por ello, la alta frecuencia de intensidades bajas no favorece incluso a los surfistas principiantes o intermedios.

## 7.5 Comparación entre situación previa y con arrecife

Una vez obtenidos los resultados para el estado previo (sin arrecife) y para las situaciones con arrecifes, se puede hacer una comparativa entre ambas situaciones. Dado que los resultados entre los arrecifes de 66° y 45° no difieren drásticamente y con el fin de no hacer repetitiva la comparación, se elegirá como referencia la cresta del arrecife de 66° para este capítulo.

### Operatividad

Como era de esperar en la situación con arrecife, al imponer un obstáculo que disminuye la profundidad, la altura de ola necesaria para romper es menor, facilitando la rotura de la misma. Esto provoca un incremento de la operatividad del 13%.



**Figura 7-36** Comparación de operatividad entre estado previo y situación con arrecife

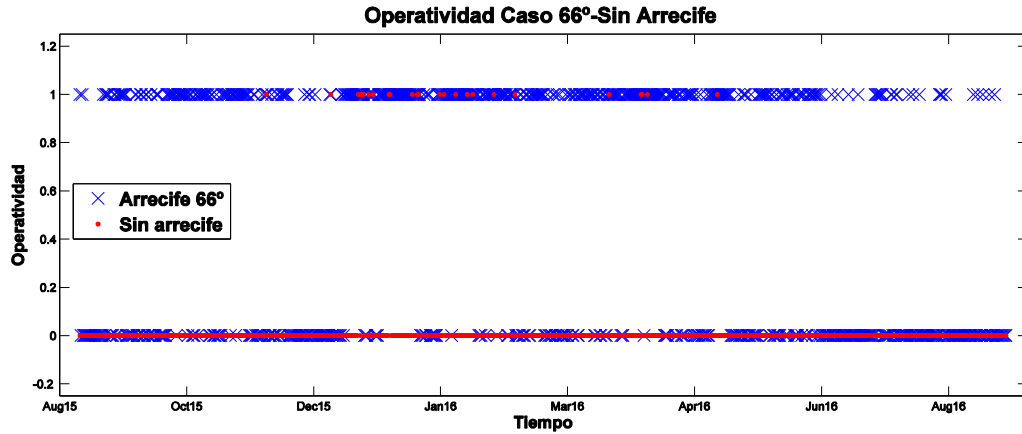


Figura 7-38 Comparación operatividad no arrecife - arrecife 66°

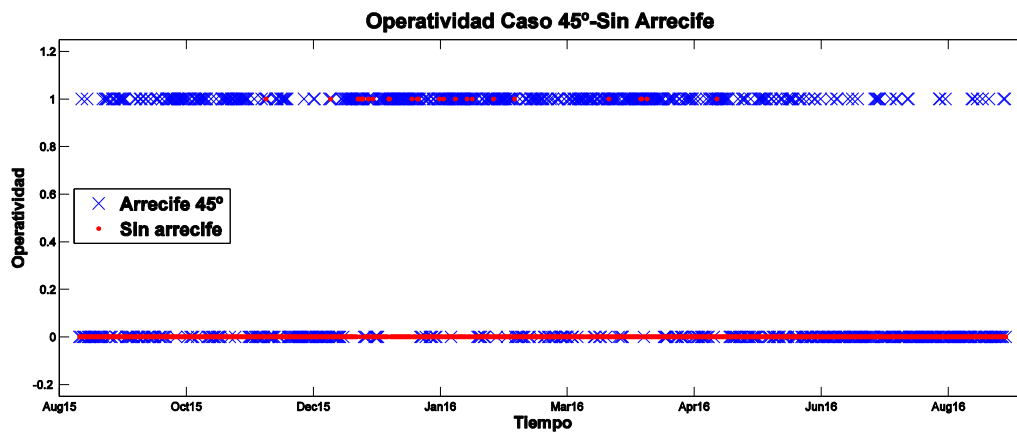


Figura 7-37 Comparación operatividad no arrecife – arrecife 45°

#### ▪ Altura de ola en rotura ( $H_b$ )

El fenómeno de asomeramiento que sufre la ola bruscamente al toparse con el arrecife genera alturas de olas mayores que la situación sin arrecife. En general, el incremento de altura de ola entre una situación y otra varía entre un 15 y 30%. Esta ganancia de altura de ola es muy favorable para los surfistas, ya que olas de poca altura dificultan la práctica de este deporte. Además, este incremento contribuye directamente a la operatividad, pues olas menores de 30 cm no se consideran surfables.

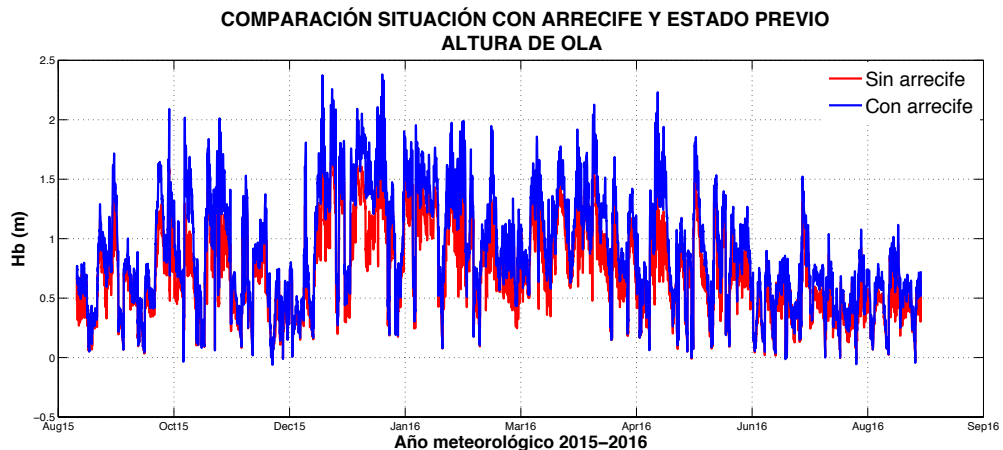
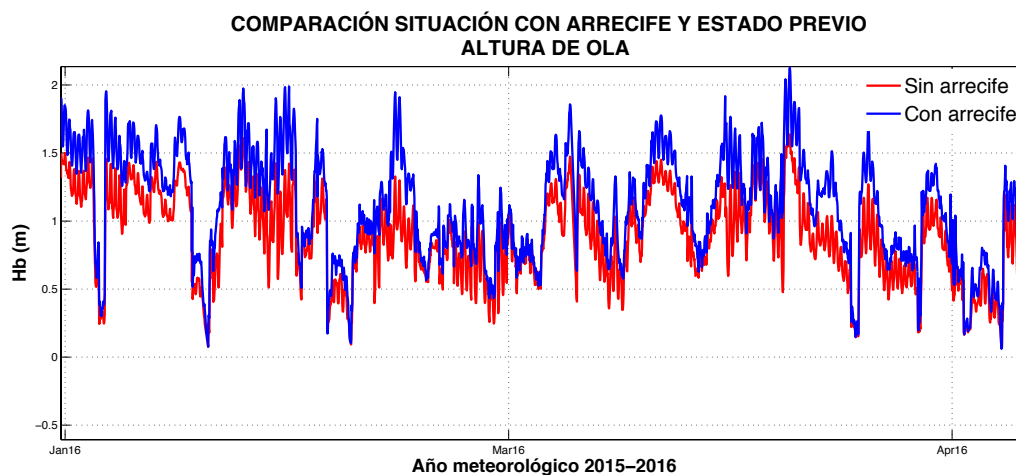


Figura 7-39 Comparación de la altura de ola en rotura entre estado previo y situación con arrecife



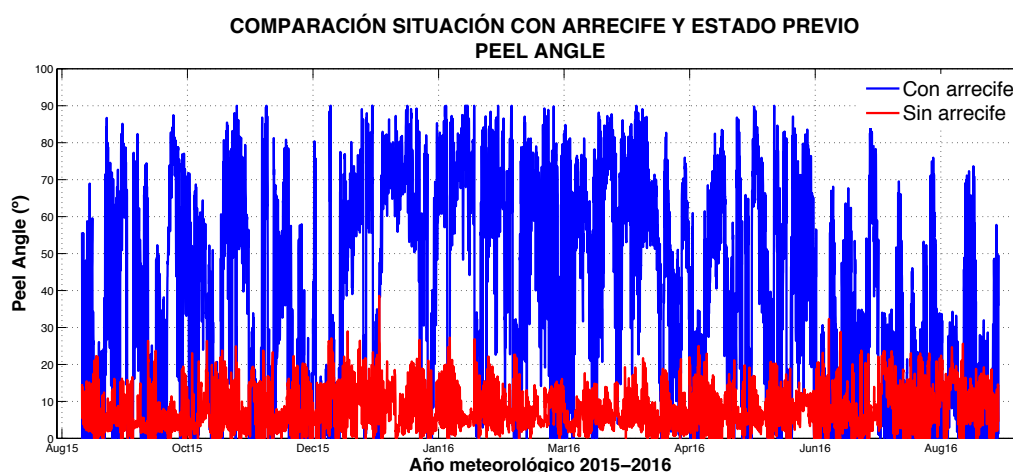
**Figura 7-40** Detalle variación de la altura de ola entre situación con arrecife y estado previo.

#### ▪ Peel angle

Quizás sea este el parámetro que sufre un cambio más relevante al construir un arrecife en la costa. Como se observa en la siguiente figura, el *peel angle* aumenta notablemente pasando de rangos de entre 0 y 20° para el caso sin arrecifes a frecuentar valores entre 50 y 90°.

Recordando la definición de ángulo de descrestamiento, el motivo de esta variación tiene una fácil explicación. La alteración de la batimetría provoca una variación de la línea de rotura. Si esta se dispone de forma oblicua respecto a los frentes de ondas predominantes, el ángulo de descrestamiento –ángulo entre frente de onda y línea de rotura- aumenta.

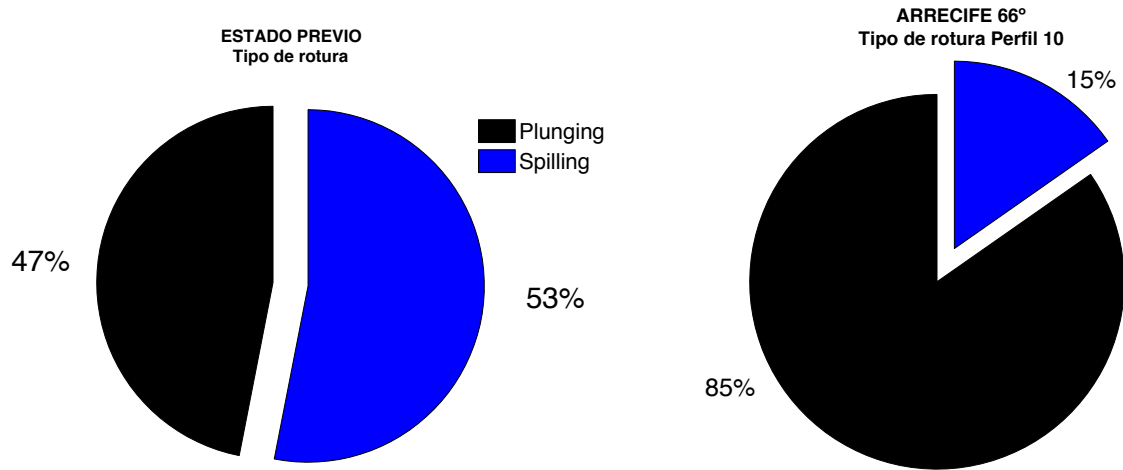
Este parámetro es clave en el grado de dificultad de la ola, pues valores bajos del *peel angle* conllevan rápidas maniobras para el surfista, haciéndolo solo aptos para deportistas avanzados.



**Figura 7-41** Comparación del peel angle entre estado previo y situación con arrecife

### ▪ Número de Iribarren

En el tipo de rotura también se aprecian cambios significativos. Si bien en ambos casos la rotura se alterna entre *plunging* y *spilling*, en la situación con arrecife la rotura *plunging* es predominante, siendo esta la rotura preferida de los surfistas.

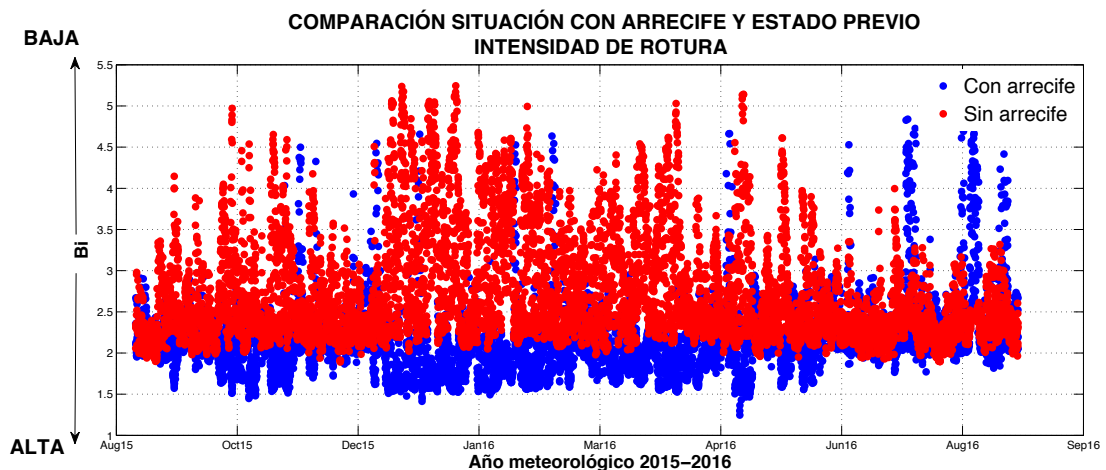


**Figura 7-42** Comparación del tipo de rotura entre estado previo y situación con arrecife

La variación del tipo de rotura para el caso con arrecife es debido al diseño de su perfil. En él, se buscaba que el gradiente del perfil disminuyera conforme descendía la profundidad (perfil convexo), fomentando precisamente este tipo de roturas (5.2.4).

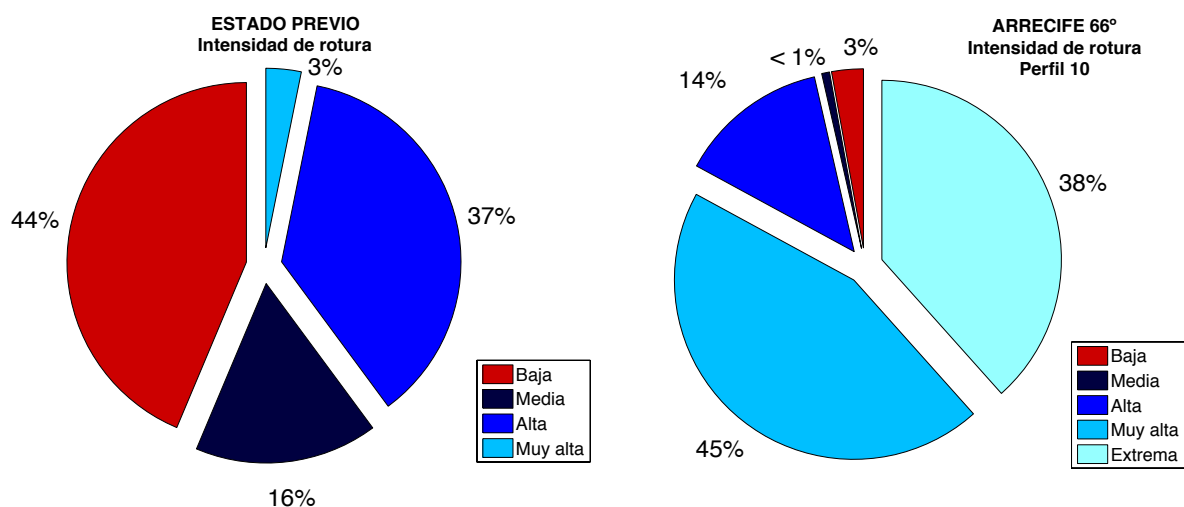
### ▪ Intensidad de rotura

Al igual que con el tipo de rotura, el perfil diseñado en el arrecife ha influido en la intensidad con la que rompe la ola.



**Figura 7-43** Comparación del tipo de rotura entre estado previo y situación con arrecife

En las figuras se aprecian claramente los resultados opuestos que se obtienen para las dos situaciones. Con el arrecife, predominan intensidades altas y extremas, mientras que en el estado previo predomina la intensidad baja.

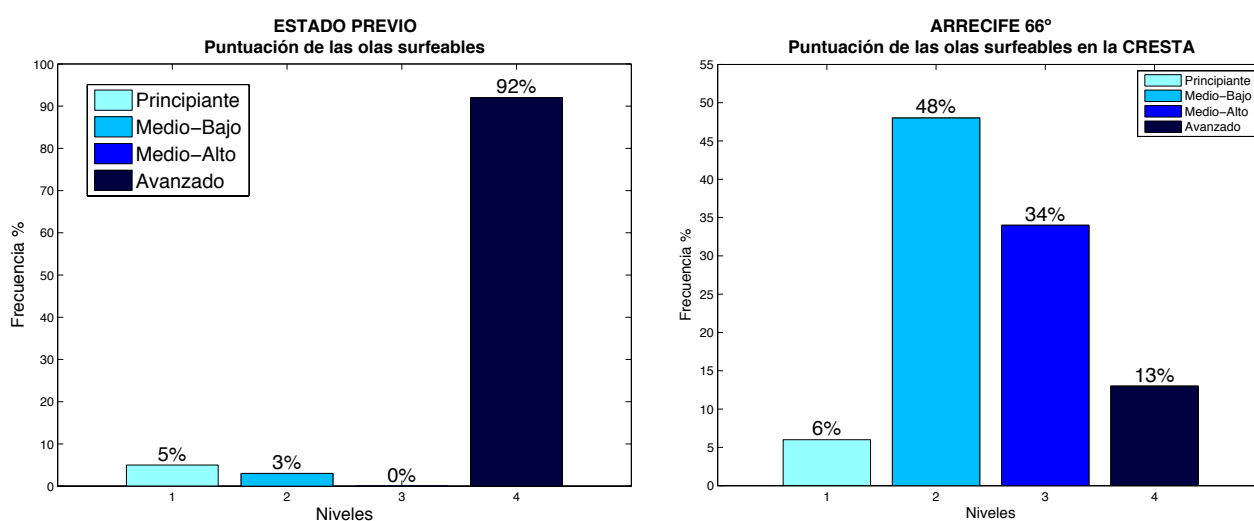


**Figura 7-44** Comparación de rangos de intensidad de rotura entre estado previo y situación con arrecife

Si bien las intensidades altas están asociadas, en general, a surfistas experimentados, las intensidades bajas no son siquiera adecuadas para los surfistas principiantes, pudiéndose considerar incluso la ola como no surfable. Por tanto, la implantación del arrecife ha provocado efectos muy beneficiosos en la intensidad de rotura de la ola, mejorando claramente el estado previo.

#### ■ Grado de dificultad de la ola

Como consecuencia de las diferencias que se acaban de analizar de altura de ola, *peel angle*, tipo e intensidad de rotura, la ola resultante tendrá un grado de dificultad para ser surfada diferente en cada caso.

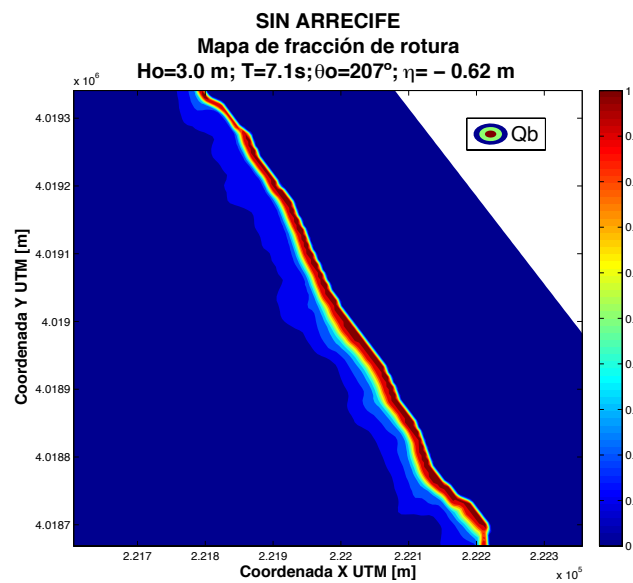


**Figura 7-45** Comparación del grado de dificultad de la ola entre estado previo y situación con arrecife

En la figura superior se observa que los resultados son totalmente opuestos. El arrecife ha provocado que ese 92% de olas de dificultad extrema se vea repartido en olas de dificultad baja-moderada. Como se explicó anteriormente, el motivo fundamental de este cambio es debido al *peel angle*, clave en el grado de dificultad de la ola.

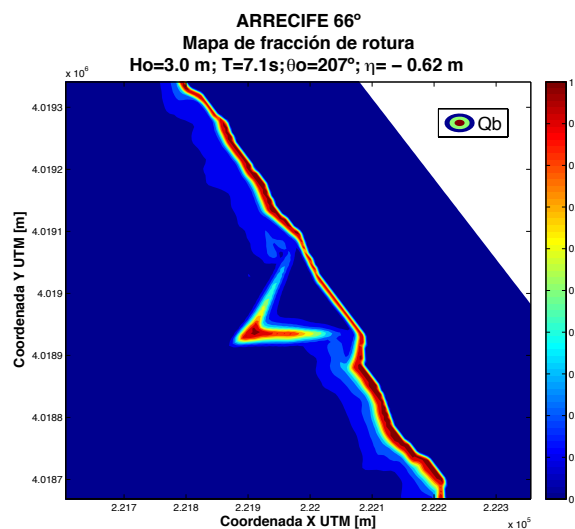
#### ▪ Fracción de rotura

La fracción de rotura es la disipación por rotura inducida por profundidad. Cuando la fracción de rotura es 0 no ha roto ninguna ola, y valdrá 1 cuando hayan roto todas las olas. Se trata de un parámetro de medición de rotura muy visual para tener una idea rápida de las roturas en una región. A continuación se muestran estos resultados en ambos casos.



**Figura 7-46** Mapa de fracción de rotura. Estado previo

Para el caso sin arrecife, se observa que las roturas de las olas se concentran en una pequeña franja en la línea de costa. Es decir, la inmensa mayoría de las olas rompen en la playa, con muy poca disipación de energía previa.



**Figura 7-47** Mapa de fracción de rotura. Arrecife 66°

Sin embargo, cuando se implanta el arrecife frente a la costa la situación cambia considerablemente. En la cresta del arrecife y el aspa sur, el mapa de fracción de rotura indica que un alto porcentaje del oleaje rompe. Dado que el estado de mar representado es del SW, el aspa norte se encuentra al resguardo, disipando menor cantidad de energía.

Se puede apreciar, además, que el arrecife provoca una disminución de disipación de energía por parte de la línea de costa detrás de ella. Esto se debe, como se ha dicho, al efecto disipador de energía por rotura del arrecife.

#### ▪ Resumen

A continuación se resumen las diferencias fundamentales, *a grosso modo*, observadas en cada parámetro, así como en la dificultad de la ola obtenida.

Parámetro	Impacto con arrecife
Operatividad	<i>Aumento</i>
Altura de ola en rotura	<i>Aumento</i>
Peel angle	<i>Aumento</i>
Tipo de rotura	<i>Paso de spilling a plunging</i>
Intensidad de rotura	<i>Aumento</i>
Puntuación	<i>Disminución del grado de dificultad de la ola. Aumento de la surfeabilidad</i>

**Tabla 7-1** Resumen del impacto generado por el arrecife a los parámetros



## 8 CONCLUSIONES

---

Los objetivos de este Trabajo Fin de Máster estaban divididos en dos bloques diferenciados. Por un lado, establecer una serie de parámetros de diseño que garanticen el buen funcionamiento de los arrecifes artificiales para la práctica del surf. Por último, formular una herramienta que permita optimizar el análisis de la viabilidad de un arrecife para su vida útil.

En cuanto al primer objetivo, una vez comparado los resultados entre el caso con arrecife y el estado previo, se puede concluir lo siguiente:

- La operatividad o surfeabilidad del arrecife aumenta del orden de un 15%. Si consideramos que los surfistas potenciales no serán de nivel experto, la operatividad aumenta un 50%. Es decir, la construcción del arrecife permitiría la práctica del surf el doble de días que en la situación actual.
- La altura de la ola en rotura ha aumentado del 15% al 30%.
- El *peel angle*, parámetro fundamental que marca el grado de dificultad de la ola, aumenta notablemente pasando de rangos de entre 0° - 20° para el caso sin arrecife a frecuentar valores entre 50° y 90°, permitiendo así la *cogida* de la ola. Esta variación es resultado del ángulo de abertura de las aspas del arrecife.
- El perfil convexo diseñado del arrecife fomenta la rotura de ola tipo *plunging*, considerado el ideal para la práctica del surf por la formación de la voluta en la cresta de la ola.
- Como consecuencia principalmente de la modificación del *peel angle*, el grado de dificultad de la ola disminuye drásticamente. Si en el estado previo más del 90% de las olas solo eran aptas para surfistas avanzados, el arrecife invierte la situación, siendo en torno al 70% de las olas adecuadas para surfistas principiantes-intermedios.

Dada la influencia que tiene el *peel angle* en los resultados, y que, como se ha dicho, la abertura de las aspas es determinante en este aspecto, se ha realizado una comparativa entre un arrecife de 66° y otro de 45°, cuyas conclusiones son las siguientes:

- La operatividad, altura de ola y tipo de rotura no presentan ninguna variación reseñable al cambio de abertura.
- Una abertura menor (45°) genera roturas con *peel angle* mayores, facilitando la práctica del surf a los surfistas principiantes.
- En ambos casos, la cresta proporciona olas con menor grado de dificultad (mayores *peel angle*). La zona de las aspas, en general, presentan *peel angle* menores debido a la refracción de los frentes de ondas.

Para la consecución del segundo y último objetivo, se ha empleado una metodología basada en la técnica de *downscaling*. De esta técnica y sus resultados se puede concluir:

- Permite disminuir los costes computacionales de forma extraordinaria, al reducir el proceso de propagación de oleaje de toda la serie histórica a sólo un subconjunto representativo.
- Los resultados obtenidos son lo suficientemente precisos para elaborar un análisis de la viabilidad de los arrecifes. Esta técnica puede ser aplicada en la Ingeniería Marítima para el estudio de viabilidad de obras marítimas.

A pesar del gran desarrollo sobre los arrecifes artificiales durante los últimos años, es aún un área de investigación relativamente joven. La herramienta desarrollada en este TFM podría aplicarse a un estudio morfodinámico del arrecife, para conocer el efecto que tendría sobre la costa (erosión/acreción) y su evolución a lo largo de la vida útil.

## REFERENCIAS

- Black, M. y Mead, S. 2009.** *Design of Surfing Reefs*. 2009.
- Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R. 2011.** *A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas*. *Coastal Engineering*, Vol 58, Issue 9, pp 851-862, doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007. 2011.
- Dally, W.R. 1989.** *Quantifying beach surfability*. *Proc. Beach Technology Conference (Tampa, Florida)*. 1989.
- Dally, W.R. 1990.** *Stochastic Modelling of Surfing Climate*. *Proceeding The 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE*, Vol. 516-529. 1990.
- Galvin, C.J. 1968.** *Breaker type Classification on Three Laboratory Beaches*. *Joarnal of Geophysical Research*, 73(12), 3651-3659. 1968.
- Gómez Pina, Gregorio, Galo, Díez y Ramírez, Jose Luis. 1993.** *Proyecto de regeneración de la playa urbana de La Zurriola (San Sebastian)*. 1993.
- Hearing, J.M. 2006.** *Preliminary design of an artificial surfing reef for Cocoa beach, Florida*. s.l. : M.Sc. thesis, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL., 2006.
- Hutt, J.A. 1997.** *Bathymetry and Wave Parameters Defining the Surfing Quality of Five Adjacent Reefs*. 1997.
- Hutt, J.A., Black, K.P. y Mead, S.T. 2001.** *Classification of surf breaks in relation to surfing skill*. s.l. : Journal Coastal Research, 2001.
- Mack, I.D. 2003.** *Quantitative Assessment of the Surfability of Pratte's Artificial Surfing Reef Santa Monica Bay*. Los Angeles, California. : Master's thesis, 2003. pág. 12.
- McCowan, J. 1891.** *On the solitary wave*. *Phil, Mag., J.Sci.*, vol. 32, no.5, pp 45-48. 1891.
- Mead, S.T. and Black, K.P. 2001a.** *Field studies leading to the bathymetric classification of World-Class surfing breaks*. s.l. : Journal of Coastal Resarch, 2001a.
- Mead, S.T. and Black, K.P. 2001b.** *Functional component combinations controlling surfing quality at world-class surfing breaks*. s.l. : Joarnal of Coastal Research, 2001b.
- Mead, S.T. and Black, K.P. 2001c.** *Predicting the breaking intensity of surfing waves*. s.l. : Journal of Coastal Research, 2001c.
- Mendonça, Ana, y otros. 2012.** *Hydrodynamics around an Artificial Surfing Reef at Leirosa, Portugal*. 2012. Joarnal of waterway, port, coastal, and ocean engineering.
- MOFFAT y NICHOL. 1981.** *Low-cost Shore Protection: Final Report on Shoreline Erosion Control Demonstration Program (Section 54), US Army Coastal Engineering Reseach Center, Fort Belvoir, VA*. 1981.
- Neves, M. 2006.** *Artificial Surfing Reefs: The preparation of physical tests and the theory behind*. 2006.
- Patrick, D.A. y Wiegel, R.L. 1954.** *Amphibian tractors in the surf; Proceedings of First Conference on Ships and Waves*. *The Engineering Foundation Council on Waves Research* . 1954.
- Ranasinghe, M., Turner, I.L. y Symonds, G. 2006.** *Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study*. s.l. : Journal of Coastal Engineering, 2006.

**ROM 0.2-90.** *Recomendaciones para las obras marítimas.*

**Scarfe, B.E. 2002.** *Categorising surfing manoeuvres using wave and reef characteristics.* Hamilton, New Zealand : Department of Earth Science, 2002.

**Scarfe, B.E., y otros. 2003.** *The Science of Surfing Waves and Surfing Breakers.* 2003.

**Voorde, M.T. 2009.** *Contributions to the design of multi-functional artificial reefs.* s.l. : PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, 2009.

**Voorde, M.T., Neves, M.G. y Antunes do Carmo, J.S. 2008.** *Preliminary study on the geometry of an artificial reef for coastal protection and surfing along the West coast of Portugal.* s.l. : J. Integ. Coastal Zone Manage, 2008.

**Walker, J.R. 1974.** *Wave transformations Over a Sloping Bottom and Over a Three-Dimensional Shoal.* PhD. Dissertation, University of Hawaii, 1974. 1974.

**Walker, J.R. y Palmer, R.Q. 1972.** *Recreational Surfing on Hawaiian Reefs. Proceeding 13th Coastal Engineering Conference, 1972. Vancouver, B.C., Canada.* 1972.

**Walker, J.R.; Palmer, R.Q. 1971.** *The general surf site concept. Look Laboratory TR-18, University of Hawaii, Department of Ocean Engineering, Honolulu, Hawaii.* 1971.

